Systemtechnische Untersuchung eines Hybridsystems bestehend aus Photovoltaikanlage und Dampfmaschine mit Kraft-Wärme-Kopplung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

des Fachbereiches Elektrotechnik der

von
Dipl.-Phys. Klaus Brinkmann
aus Rheinkamp / Moers

Hagen 1999

dissertation.de
Verlag im Internet

dissertation.de
Verlag im Internet
Fritschestr. 68
D-10 585 Berlin

E-Mail: dissertation.de@snafu.de
URL: http://www.dissertation.de

Eingereicht:	10. Februar 1999
Mündliche Prüfung:	14. Juni 1999
1. Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlev Hackstein
2. Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid

Meinen aufrichtigen Dank für die Förderung und Unterstützung dieser Arbeit schulde ich Herrn Prof. Dr.-Ing.- Detlev Hackstein. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid bin ich sehr dankbar für die Übernahme des Korreferats.

Meinen Kollegen, sowie dem gesamten Team des Lehrgebiets für Elektrische Energietechnik, danke ich für die anregenden Diskussionen. Ein herzlicher Dank gilt insbesondere Herrn Wolfgang Köhler für die praktische und organisatorische Unterstützung.

Einen nicht minder wichtigen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit haben Studenten mit ihrer Diplomarbeit geleistet. Auch bei ihnen möchte ich mich bedanken.

Mein ganz privater Dank gilt meiner Familie, die mit viel Geduld und Toleranz diese Arbeit begleitet hat, auch wenn ich nicht versprechen kann, daß das Chaos auf meinen Schreibtischen in Zukunft eine abnehmende Entropie erfahren wird.

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen und Bezeichnungen

Symbole	***Einheit***	***Zeichenerklärung***
$\overline{P}_{d,Prozeßwärme}$	kWh/d	Tagesleistung (Durchschnitt)
$P_{d,Wärme}$	kWh/d	Tagesleistung
$\dot{Q}_{zu}$	W	zugeführte Wärmeleistung
$\dot{V}$	m³/s	Volumenstrom
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
$\overline{c}_p$	J/kgK	gemittelte Wärmekapazität
"	-	Zeichen für die Einheit Zoll
' , "	-	Zeiger für Wasser- bzw. Dampfzustände
ε	-	relativer Schadraum
κ	-	Adiabatenexponent
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit
$\varnothing$	m	Durchmesser
τ	-	Verhältnis mechanischer Leistung zur Wärmeleistung
Δ	-	Änderung
Λ	-	Steigungskoeffizient
υ	-	Strom-Wärme-Verhältnis-Faktor
ξ	-	Skalierungsfaktor
υ	-	Füllgrad
η	-	Wirkungsgrad
α , β	rad	Winkel
ρ , ρ_0	kg/m³	Dichte
σ, σ_{Mittel}, σ_d	-	Stromkennzahl
η_{Ah}, η_{Wh}	-	Ah- bzw. Wh-Wirkungsgrad
η_B , $\eta_{B,effektiv}$	-	Batterie-Wirkungsgrad
$\sigma_{d,PV}$	-	Strom-Wärme-Verhältnis für KWK mit PV-Anlage
$\eta_{elektrisch}$, $\eta_{thermisch}$	-	elektrischer bzw. thermischer Wirkungsgrad
η_{gesamt}	-	Gesamtwirkungsgrad
η_{ideal} , η_{real}	-	idealer bzw. realer Wirkungsgrad
α_{IK}, α_{UL}, α_{PMPP}	1/°C	Temperaturkoeffizienten
σ_{KWK}	-	Strom-Wärme-Verhältnis für die KWK-Anlage
$\vartheta_{L,m}$, $\vartheta_{L,Monat}$	°C	mittlere Lufttemperatur
ϑ_{min} , T_{min}	°C, K	Kondensattemperatur

Δp	bar	Druckdifferenz
η_{Pumpe}	-	Pumpenwirkungsgrad
η_{PV}	-	PV-Wirkungsgrad
η_{rev} , η_C , $\eta_{Prozess}$	-	thermodynamische Wirkungsgrade
γ_S	rad	Sonnenhöhe (Winkel)
δ_S	-	Ungleichförmigkeitsgrad
ϑ_S , T_S	°C, K	Siedetemperatur
η_{Strom}	-	Wirkungsgrad zur Wandlung von mechanischer Leistung in elektrische
ΔT	K	Temperaturdifferenz
$\overline{P}_{a,Heizung}$, $\overline{P}_{a,Prozeßwärme}$	kWh/a	Jahresleistung (Durchschnitt)
$\overline{P}_{d,Heizung}$, $\overline{P}_{d,Wärme}$	kWh/d	Tagesleistung (Durchschnitt)
$\overline{P}_{d,Strom}$, $P_{d,Strom}$, P_W	kWh/d	Tagesleistung
$\dot{Q}, \dot{Q}_D, \dot{Q}_{DM}, \dot{Q}_{WT}, \dot{Q}_{AB}, \dot{Q}_W$	W	Energieströme
λ	nm	Wellenlänge
ν	1/s	Frequenz
σ	W/m^2K^4	Strahlungskonstante
ϑ	°C	Temperatur
A	m²	Fläche
a	-	Jahr
a , b	-	Proportionalitätsfaktoren
A_0	m²	Grundfläche
Ah	-	Amperestunden
a_i	-	Koeffizienten
AM, AM0, AM1, AM1,5	-	Air Mass
A_{PV}	m²	PV-Fläche
BHKW	-	Blockheizkraftwerk
c	m/s	Vacuum-Lichtgeschwindigkeit
c	J/kgK	Wärmekapazität
c_0	-	Koeffizient, Proportionalitätsfaktor
$C_{Batterie}$	Ah, kWh	Akkumulator-Kapazität
CO_2	-	Kohlendioxid
C_V , C_p , c_{pm}	J/kgK	Wärmekapazitäten
D	-	Diode
d	-	Tag
D	kg/s	Durchmesser , Durchfluß
D	-	Index für 'Dampf'
DE	-	Index für 'Dampferzeuger'
DIN	-	Deutsche Industrie Norm

DM	-	Index für 'Dampfmaschine'
e	As	elektrische Elementarladung
E_ν , E_λ	J/m², W/m³	spektrale Strahlungsintensität
E_0, E, E_{Solar}	W/m²	flächenbezogene Strahlungsleistung
EDF	-	Electricité de France
E_g	eV	Energiedifferenz
E_S	J	Schwungrad-Energie
EU	-	Europäische Union
EVU	-	Energieversorgungsunternehmen
F	N	Kraft
F	J	Freie Energie
FF	-	Füllfaktor
F_N , F_S , F_T , F_K	N	Kräfte
G	J	Freie Enthalpie
G	-	Generator
GTO	-	Gate-Turn-Off-Thyristor
GuD	-	Gas- und Dampfturbinenanlage
h	Js	Planck'sche Konstante
h	-	Stunde
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
H	mm	Ventilhub
H_2O	-	Wasser
H_2SO_4	-	Schwefelsäure
HKA	-	Heizkraftanlage
HKW	-	Heizkraftwerk
h_n	J/kg	spezifische Enthalpie von Naßdampf
Hz	1/s	Herz (Frequenz-Einheit)
I	A	elektrische Stromstärke
i, n	-	Zählindizes
I_D	A	Diodenstrom
IGBT	-	Isolated-Gate-Bipolar-Transistor
I_K	A	Kurzschlußstrom
I_{MPP}	A	Strom im MPP
I_{PH}	A	Photostrom
I_S	A	Sättigungsstrom
J	Nm	Trägheitsmoment
J, kJ, PJ	-	Joule, Kilojoule, Pentajoule
k	J/K	Boltzmann-Konstante
k	W/m²K	Wärmeübergangskoeffizient

k_v , k_{vs}	m³/h	k_v- bzw. k_{vs}-Wert für Ventile
KWK	-	Kraft-Wärme-Kopplung
kW_{ref}	-	Leistung einer Referenz-PV-Anlage
L	m	Länge
L	W	Strahlungsleistung
lin , GL	-	Index für 'linear' bzw. 'gleichprozentig'
m	-	Anpassungsfaktor , Monat
m	-	Index für 'mechanisch'
m	-	Index für 'mittel'
M, M_0	Nm	Drehmoment
Max, Min	-	Maximum , Minimum
M_L	Nm	Lastmoment
MOSFET	-	Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor
MPP	-	Maximum Power Point
M_Z	Nm	Störmoment
n, n_0, n_1	1/min	Drehzahlen
n, p	-	Dotierungskennzeichnungen
ORC	-	Organic Rankine Process
OT , UT	-	oberer- bzw. unterer Totpunkt
P	W	Leistung
p	kgm/s	Impuls
p	bar	Druck
p_0	bar	Ausgangsdruck
PAFC	-	Phosphoric Acid Fuel Cell
Pb	-	chemisches Element Blei
PbO_2	-	Bleidioxid
$PbSO_4$	-	Bleisulfat
P_{el}	W, VA	elektrische Leistung
p_{End}	bar	Stufen-Enddruck
P_i	W	indizierte Leistung
P_{ideal}, P_{real}	W	PV-Leistung
p_K	bar	kritischer Druck
p_m	bar	mittlerer Druck
P_{mech} , $P_{mech,0}$	W, Nm/s	mechanische Leistung
p_{min}	bar	Kondensatordruck
P_{MPP}	W	Leistung im MPP
ppm	-	parts per million
PR	-	Peformance Ratio
P_{Stufe}	W, Nm/s	mechanische Stufen-Leistung

PV	-	Photovoltaik
p_V	bar	Druckverluste
Q	J, Ws	Wärmemenge
Q, Q_{zu}, Q_{ab}	C, As	Ladung
q_{zu} , q_{ab}	J/kg	zu- bzw. abgeführte spezifische Wärme
r	J/kg	Verdampfungswärme
r	m	Radius
R	-	Menge der reellen Zahlen
rev	-	Index für 'reversibel'
R_S, R_P	-	Serien-, bzw. Parallelwiderstand
S	J/kgK	Entropie
s	mm	Hub
S	-	Index für 'Schwungrad'
s_n	J/kgK	spezifische Entropie von Naßdampf
STC	-	Standardtestbedingungen
T	K	Temperatur
t, t_{zu}, t_{ab}	s	Zeit
T_K	K	kritische Temperatur
TRD	-	Technische Regeln für Dampfkessel
U	A	elektrische Spannung
U	J	Innere Energie
U_D	V	Diodenspannung
U_L	V	Leerlaufspannung
U_{MPP}	V	Spannung im MPP
U_T	V	Temperaturspannung
V	m^3	Volumen
v	m^3/kg	spezifisches Volumen
V, kV	-	Volt, Kilovolt
V_1, V_2, V1, V2, V3, V4	-	Ventile
VDE	-	Verband der Elektrotechnik
VDEW	-	Verband Deutscher Elektrizitätswerke
VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure
V_F	m^3	Füllvolumen
V_{Hub}	m^3	Hubvolumen
V_S	m^3	schädlicher Raum
w, h	J/kg	spezifische Arbeit bzw. Enthalpie
W, kW, MW	-	Watt, Kilowatt, Megawatt
W, W_r, W_t	J, Nm	Arbeit , Raumänderungsarbeit , technische Arbeit
Wh , kWh	-	Wattstunden , Kilowattstunden

Wp, kWp	-	Watt Peak , Kilowatt Peak
WT, WT1, WT2	-	Wärmetauscher
x	-	Dampfanteil , Koordinate , reelle Variable
x , y	-	Verteilungskoeffizienten
X100, X200 (≡Xn).	kJ/(min m³)	normierte mechanische Leistung bei Drehzahl n
z	-	Haushaltstyp-Umrechnungsfaktor
Z	-	Störgröße
zu, ab	-	Index für zu- bzw. abfließend

1. Einleitung und Zielsetzung

1.1 Hintergrund

Unsere heutige Energieversorgung basiert überwiegend auf fossilen Energieträgern wie Erdgas, Erdöl, Stein- oder Braunkohle. Diese sind gespeicherte Biomasse, welche vor Jahrmillionen durch die Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie entstanden sind. Die Vorräte dieser Energieträger sind begrenzt, da es keine natürlichen Vorgänge gibt, die diese auch nur annähernd im zeitlichen Rahmen des Verbrauchs wieder erzeugen könnten. Sparmaßnahmen sind deshalb unerläßlich, können aber den Zeitpunkt bis zur Erschöpfung lediglich hinauszögern. Aktuelle Schätzungen zeigen, daß die Reichweiten der fossilen Energieressourcen etwa ein bis zwei Menschenleben betragen. Diese Erkenntnis zwingt uns, unsere Energieversorgung gravierend umzugestalten [1.1]. Da die derzeitige Versorgungsstruktur über einen langen Zeitraum organisch gewachsen ist, haben sich dementsprechend komplexe Verflechtungen sowohl technisch, als auch wirtschaftlich und politisch herausgebildet. Dies hat zur Folge, daß nicht durch einfache Entscheidungen und Maßnahmen rasche Veränderungen erzielt werden können. In Anbetracht dieser Rahmenbedingungen ist es unerläßlich, sofort mit intensiven Änderungsbemühungen auf jeder Ebene zu beginnen und aufrechtzuerhalten, um nicht in ein zeitliches Energieversorgungsloch zu geraten, was sicherlich zu erheblich mehr Schwierigkeiten und Risiken für die Menschheit führt, als die jetzt auszutragenden Interessenkonflikte um unsere Energieversorgung nachhaltig umzugestalten.

Einen weiteren nicht minder wichtigen Grund zu handeln liefert der Treibhauseffekt. Dieser ist an sich nichts negatives, weil der natürliche Treibhauseffekt erst das Leben in der uns bekannten Form auf der Erde erlaubt, da sich dadurch eine mittlere Temperatur von etwa 15°C einstellt. Ohne den Schutz der Atmosphäre würden auf der Erde Temperaturen von etwa -18°C herrschen [1.2]. Den Hauptanteil am Treibhauseffekt hat dabei das Kohlendioxid (CO_2), welches durch Atmungs- und Verbrennungsprozesse aus organischen Verbindungen freigesetzt wird. Bei der Entwicklung des Lebens hat sich über Jahrtausende hinweg ein Gleichgewicht in der Atmosphäre herausgebildet, welches unsere Umwelt in der uns vertrauten Form benötigt. Um dieses Gleichgewicht zu wahren, muß die Erzeugung und die Bindung von CO_2 in der Natur ausbalanciert sein.

Das derzeitige Ausmaß der Verbrennung von fossilen Energieträgern erhöht hingegen permanent die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre und führt zu einer Verschiebung der Wärmebilanz und damit zu einer Erhöhung der mittleren Temperatur. Die Folgen dieser Entwicklung sind unabsehbar und bergen ungeheure Risiken bezüglich unserer Lebensbedingungen [1.3].

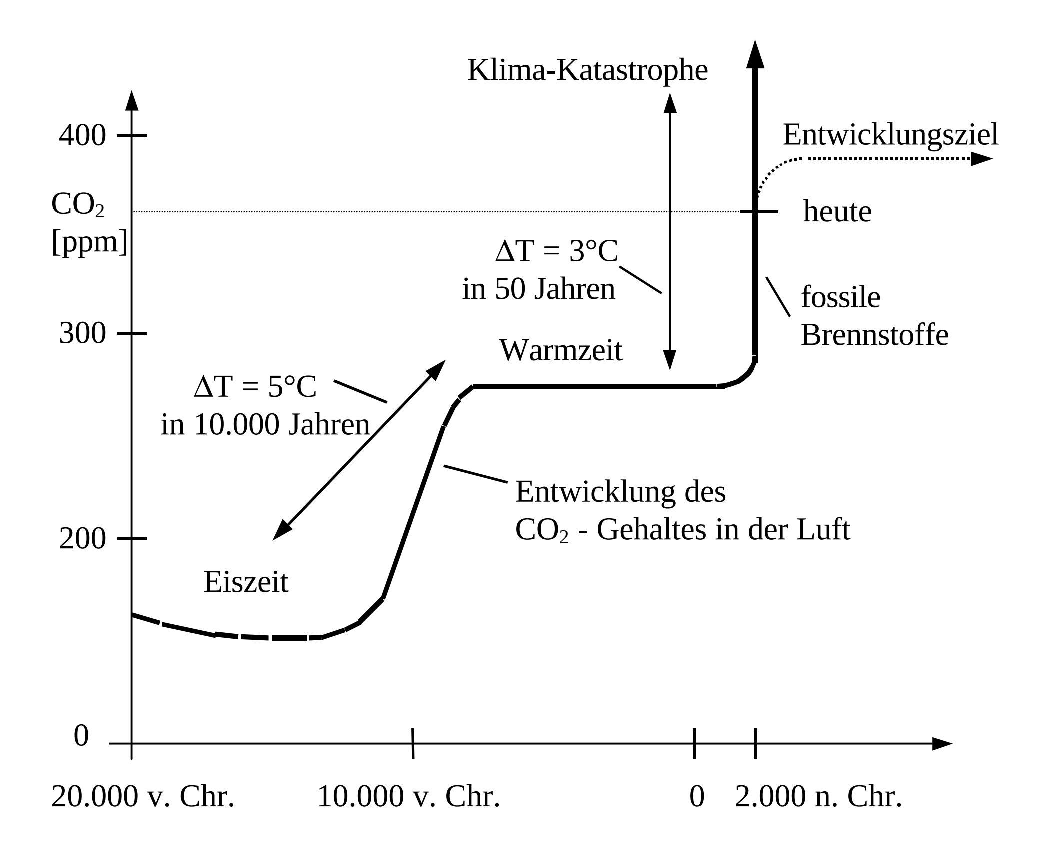


Abb. 1.1 Zunahme der CO_2 - Konzentration [1.3]

Als Abhilfe für die genannten Probleme scheint auch die Kernenergie nicht in Frage zu kommen. Zwar wird hierdurch die CO_2-Emmision reduziert, aber die Endlichkeit der Uranvorkommen macht sie in dieser Hinsicht vergleichbar mit den fossilen Energieträgern, abgesehen von den bekannten speziellen Problemen und Risiken der Kernenergie. Der derzeitige Entwicklungsstand zur Kernfusion zeigt in absehbarer Zeit keine realisierbaren Nutzungsmöglichkeiten, es bestehen sogar grundsätzliche Zweifel an den augenblicklichen Konzepten [1.4].

Der vernünftigste Ausweg aus dieser Energieproblematik im Hinblick auf unsere kurz- und mittelfristig verfügbaren Technologien, liegt wohl in der konsequenten Anwendung und im Ausbau der bereits jetzt verfügbaren Anlagen und Techniken zur Nutzung regenerativer Energieträger in Kombination mit rationeller Energieverwendung. Weiterhin erforderliche technische Entwicklungsarbeiten hierfür sollten daher mit Rücksicht auf die zeitliche Abnahme der fossilen Brennstoffe und Zunahme der CO_2-Konzentration weitestgehend parallel zu praktischen Realisierungen durchgeführt werden.

1.2 Energieversorgung privater Haushalte

Der gängigste Weg zur Erzeugung elektrischer Energie erfolgt über die Umwandlung der chemischen Energie in den fossilen Brennstoffen in Wärme, die mit Hilfe eines Dampfprozesses über Turbinen mechanische Arbeit an Generatoren verrichtet. Bei Öl und Gas können auch direkt Gasturbinen eingesetzt werden. Neuere Konzepte favorisieren GuD-Kraftwerke mit kombiniertem Gas- und Dampfturbinenprozeß aufgrund des vergleichsweise besseren energetischen Nutzungsgrades.

In Deutschland werden derzeit dabei hauptsächlich heimische Energieträger eingesetzt, wobei 50% ungefähr je zur Hälfte auf Stein- und Braunkohle entfällt. Die Kernenergie hat einen Anteil von ca. 35%, den Rest erbringen der Rangfolge entsprechend im wesentlichen Gas, eingeführte Energie, Wasserkraft und Öl [1.5].

Knapp 99% der öffentlichen Stromversorgung wird von ca. 1000 Energieversorgungsunternehmen (EVU) gewährleistet, die sowohl für die Erzeugung, den Transport als auch für die Verteilung sorgen. Diese Unternehmen gehören zu ungefähr 2/3 dem Verband Deutscher Elektrizitätswerke (VDEW) an. Die flächendeckende Versorgung Deutschlands erfolgt durch neun überregionale Unternehmen, die in der Deutschen Verbundgesellschaft zusammengeschlossen sind. In anderen Industriestaaten ist die Stromversorgung stärker zentralisiert, wie zum Beispiel in Frankreich durch das staatliche Unternehmen EDF. In England existiert nur eine Gesellschaft für das Versorgungsnetz, welche die Verbindung zwischen Kraftwerksgesellschaften und den Verbrauchern übernimmt.

Zur reinen Stromerzeugung werden hauptsächlich große zentrale Kraftwerke errichtet, die mit einem Wirkungsgrad von ungefähr 30% elektrische Energie liefern. Dies bedeutet, daß ca. 70% der Primärenergie in Form von Wärme in der Regel ungenutzt in die Natur entlassen wird [1.1].

Abgesehen von vereinzelten Versorgungen mit Hilfe von Blockheizkraftwerken, die verbrauchernah sowohl den Strom als auch die notwendige Heizwärme zur Verfügung stellen, erfolgt die Wärmeversorgung hauptsächlich über Heizkessel, die sich innerhalb der betreffenden Gebäude befinden. Eine flächendeckende Energieversorgung mit ökologisch sinnvoller Kraft-Wärme-Kopplung setzt aufgrund der damit verbundenen Rohrleitungssysteme eine dezentrale Versorgungsstruktur voraus, im Gegensatz zur gegenwärtigen Systemtechnik. Bei der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung sind dann Wirkungsgrade von fast 90% erreichbar, wodurch sich dementsprechend Primärenergie einsparen läßt. Allerdings stehen den ökologischen Aspekten die hohen Investitionskosten für das Wärmenetz entgegen [1.6]

1.3 Rationelle Energieverwendung

Die erschöpflichen Energiequellen stellen zur Zeit, aber wie bereits ausgeführt nicht mehr lange, die wichtigste Versorgungsgrundlage der Menschen dar. Man geht mit dieser Energie nicht nur insofern verschwenderisch um, als man die natürlichen Energiespeicher rücksichtslos entleert, sondern auch indem man die Energie im allgemeinen mit einem sehr schlechten Wirkungsgrad nutzt. Die Erzeugung mechanischer Energie, welche mit Hilfe von Generatoren in elektrische gewandelt werden kann, ist bei thermischen Prozessen naturgesetzlich durch den Carnotschen Wirkungsgrand nach oben begrenzt. Praktisch liegen die Wirkungsgrade noch erheblich niedriger.

Da Energieverbrauch Kosten verursacht, liegt es im Interesse aller Abnehmer rationell mit Energie umzugehen. Dies setzt aber voraus, daß der Anwender über ausreichende Kenntnisse bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Zusammenhänge der von ihm benutzten energieverbrauchenden Geräte verfügt. Hierfür benötigt man Informationsdienste, welche möglichst objektiv ökologische, technische und wirtschaftliche Faktoren gegeneinander abwägen und dementsprechend beraten. Das entscheidendste Kriterium für eine rationelle Energieverwendung ist sicherlich ein hohes Verantwortungsbewußtsein gegenüber der Umwelt und den nachfolgenden Generationen, sowohl der einzelnen Bürger als auch des Staates. Insbesondere die wirtschaftlichen Bewertungsfaktoren sind im starken Maße von den Entscheidungen des Staates und den von ihm geschaffenen Versorgungsstrukturen abhängig.

Politik und Gesellschaft stehen gemeinsam in der Verpflichtung auf einen sparsamen Umgang mit den Energieressourcen hinzuwirken [1.7].

Eine entscheidende Komponente wird hierbei, neben einer allgemeinen Verbrauchsminimierung, ein weitgehender Ausbau hin zu Kraft-Wärme-Kopplungs-Systemen sein müssen, um den Gesamtwirkungsgrad der Primärenergienutzung zu maximieren.

Diese Maßnahmen allein würden aber jedoch nur den Zeitpunkt bis zum endgültigen Verbrauch der Ressourcen hinauszögern. Diese Verzögerung ist aber unverzichtbar, um in Kombination mit einer rationellen Energieverwendung unser Energieversorgungssystem in zunehmendem Maße durch "regenerative" Energiequellen zu ergänzen, damit wir uns letztlich ganz auf erneuerbare Energien stützen können, welche nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich sind. Dies führt dann in Folge ebenfalls zu einer unbedingt anzustrebenden CO_2-neutralen Energieversorgung.

1.4 Regenerative Energien

Grob kann man die erneuerbaren Energien in die drei Bereiche *geothermische Energie, Gezeitenenergie* und *Sonnenenergie* einteilen. Diese Energiequellen sind für menschliche Zeitmaßstäbe unerschöpflich. Es ist anzumerken, daß der in diesen Zusammenhängen verwendete Energiebegriff sich immer auf die technisch nutzbare Energie bezieht, denn nach den Naturgesetzen, wie sie uns die Physik erschlossen hat, ist Energie weder erzeugbar noch kann sie vernichtet werden, sie kann lediglich ihre "Träger" wechseln.

Die jährlich angebotene Energiemenge durch erneuerbare Quellen ist um Größenordnungen höher als der weltweite Energiebedarf. Durch verschiedene natürliche Umwandlungsprozesse innerhalb der Erdatmosphäre werden aus diesen Quellen unterschiedliche weitere Energieströme hervorgerufen. Dabei hat die Sonnenenergie mit einem Anteil von 99,9% den dominierenden Einfluß [1.8].

Die auf die Erde eingestrahlte Sonnenenergie kann demzufolge sowohl direkt, als auch indirekt in Form von Windenergie, Wasserkraft und Biomasse genutzt werden. Meereswellen und Meereswärme sind ebenfalls dem Einfluß der Sonne zuzurechnen. Die geothermische Energie, auch Erdwärme genannt, ist eine Folge der Summe von drei Ursachen. Diese sind die Ursprungswärme vor der Erdentstehung, der Restwärme der bei der Entstehung freigesetzten Gravitationsenergie sowie die kumulierte Wärme der radioaktiven Zerfallsprozesse im Erdinnern. Die abgeschätzte Erdwärme entspricht vergleichsweise einer von der Sonne über viele Millionen Jahre auf die Erde eingestrahlten Energiemenge.

Die Gezeitenenergie oder Planetenenergie ergibt sich aus gravitationsbedingten Deformationsvorgängen aufgrund der Kreisbewegung von Erde und Mond um den gemeinsamen Schwerpunkt. Aufgrund der Beweglichkeit der Wassermassen resultiert daraus die regelmäßige Abfolge von Ebbe und Flut.

Die aus den erneuerbaren Energiequellen resultierenden Energieströme unterscheiden sich erheblich hinsichtlich der Energiedichte und der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit.

Dies ist im Hinblick auf die Nutzungstechnologien ein wesentlicher Unterschied zu den fossilen Energieträgern, die, solange deren Verfügbarkeit noch ausreicht, zu jedem Zeitpunkt steuerbar genutzt werden können, wenn es die Verbraucher wünschen.

Theoretisch können die erneuerbaren Energien problemlos den gesamten Weltenergiebedarf decken [1.2]. Abgesehen von den Fragestellungen zum Aufbau einer darauf abgestimmten zukünftigen Energiewirtschaft ist zu klären, welchen Anteil die unterschiedlichen erneuerbaren Energien erhalten werden, um eine zur fossilen Versorgung vergleichbare Verfügbarkeit von Energie erreichen zu können.

1.5 Photovoltaische Hybridsysteme

Die Sonnenstrahlung, als die mit Abstand größte regenerative Energiequelle, kann direkt über photovoltaische Systeme zur Stromerzeugung genutzt werden. Die Photovoltaik zeichnet sich durch vielseitige Einsatzmöglichkeiten aus und hat vor allem den Vorteil eines modularen Aufbaus.

Das Strahlungsangebot für eine Photovoltaikanlage wird zum einen durch den gesetzmäßig determinierten zeitlichen Verlauf des Sonnenstands, und zum anderen durch die stochastischen meteorologischen Standortbedingungen beeinflußt. Dies bedeutet, daß die Auslegung einer solchen Anlage sich auf statistische Einstrahlungsdaten stützen muß, um die sehr starken tageszeitlichen und jahreszeitlichen Schwankungen zu berücksichtigen.

Dies gilt insbesondere, wenn eine netzunabhängige Versorgung gewährleistet werden soll, in diesem Fall spricht man dann von Inselanlagen. Solche Inselanlagen sind in der Regel mit einem ausgleichenden Batteriespeicher ausgestattet, um ein gleichmäßiges Energieangebot zur Verfügung stellen zu können.

Mit zunehmender gewünschter verfügbarer Leistung ist jedoch meist eine zusätzliche Energieversorgungseinheit zur Unterstützung vorzusehen. Insbesondere die Berücksichtigung des gravierenden Unterschieds zwischen Sommer- und Winterverhältnissen könnte dazu führen, daß sowohl die Photovoltaikanlage als auch der Batteriespeicher in unvernünftiger Weise überdimensioniert werden müßte.

Bei netzgekoppelten Systemen kann auf den Energiespeicher verzichtet werden. Hier besteht die Möglichkeit, sowohl Defizite auszugleichen, als auch Energie in das elektrische Netz einzuspeisen.

Photovoltaische Systeme, die über einen weiteren elektrischen Energieerzeuger verfügen, stellen ein Hybridsystem dar. Dieser zusätzliche Energieerzeuger kann zum Beispiel ein Windkraftgenerator, ein Dieselgenerator oder ein Gasmotor sein [1.9].

Wird außer einer Stromversorgung ebenfalls eine Deckung des Wärmebedarfs gewünscht, so bietet sich eine Kraft-Wärme-Kopplung als sinnvolle Ergänzung an, wenn die Versorgung sich am Wärmebedarf ausrichten läßt.

Auf diese Weise lassen sich insbesondere die thermische und elektrische Versorgung von netzfernen Anwesen sicherstellen.

Verdeutlichen wir uns jedoch noch einmal die bereits ausgeführte Notwendigkeit, fossile Brennstoffe einzusparen und erneuerbare Energien einzusetzen, so zeigen aktuelle Abschätzungen, daß die politisch gesetzten Ziele zur zeitlich gestaffelten Reduktion der CO_2-Emisionen nur erreichbar sind, wenn in erheblichem Umfang auch Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt wird [1.10]. Dies verschafft einen Zeitaufschub, der dann intensiv für den Ausbau einer vollständig regenerativen Energieversorgung genutzt werden muß.

Konsequenterweise sollten letztlich dann auch die Kraft-Wärme-Kopplungen mit nachwachsenden Rohstoffen arbeiten. Wenn diese nicht schon von vornherein so konzipiert werden, so sollten sie hierfür ohne größeren Aufwand umrüstbar sein.

Berücksichtigt man weiterhin, daß Kraft-Wärme-Kopplung weitgehend dezentrale Versorgungsstrukturen impliziert, scheinen photovoltaische Hybridsysteme mit Kraft-Wärme-Kopplung im besonderen Maße geeignet, die gesteckten Ziele zu erreichen, oder zumindest einen erheblichen Beitrag zu leisten.

Derartige Systeme könnten in Zukunft im Verbund mit den anderen oben genannten regenerativen Quellen wie zum Beispiel der Windkraft in einem vielfältigen Energie-Mix das bisherige fossile Versorungssystem ersetzen.

1.6 Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit zeigt die Möglichkeit auf, Privathaushalte mit einem Hybridsystem bestehend aus einer Photovoltaikanlage mit einer "Dampfmaschine" für die Kraft-Wärme-Kopplung autark sowohl mit Strom als auch mit Wärme zu versorgen. Dabei wird von den hiesigen klimatischen Verhältnissen ausgegangen.

Eine autarke Versorgung stellt eine höhere systemtechnische Herausforderung dar, als eine netzgekoppelte Version. Gelingt jedoch das autarke Prinzip, so garantiert ein Verbund vieler solcher Systeme mit einer höheren Wahrscheinlichkeit ein statistisch ausgeglichenes Energieangebot für alle Teilnehmer.

Die Entscheidung , die Kraft-Wärme-Kopplung mit Hilfe einer Dampfmaschine zu realisieren, mag zunächst etwas provokant anmuten, fehlt dieser Technik doch die psychologische Verknüpfung mit dem Qualitätsmerkmal 'High-Tech', wie man es bei modernen Entwicklungsaufgaben zu suchen pflegt.
Aber gerade Entwicklungen, die sich mit einer der Natur besser angepaßten Energieversorgungstechnik befassen, dürfen nicht ausschließlich nach rein technischen Bewertungskriterien begutachtet werden, wie man es von der heutigen industriellen Produktentwicklung kennt. Dort bildet ein hoher High-Tech-Standard auch ein wichtiges Marketingelement.

Dies soll aber nicht bedeuten, daß der Stand der Technik aus der Anfangsphase der industriellen Revolution übernommen werden soll. Selbstverständlich ist davon auszugehen, daß ein solches Hybridsystem letztlich mit einer 'modernen' Dampfmaschine auszustatten ist, welche dem heutigen Entwicklungsstand des Maschinenbaus gerecht wird.

Ein beeindruckendes Beispiel einer derartigen Entwicklungsgeschichte, welches dazu ermutigt, ältere Technologien aufzugreifen, ist der Aufbau der modernen Windkraftanlagen, an deren Anfang ebenfalls der Rückgriff auf historische Modelle stand.

Energieversorgung für Sommer und Winter

PV-Generator
Steller / Laderegelung
Batterie
Stromverbraucher
PV
Strom
10-15%
Dampfmaschine
Generator
G
Gleichrichter
Wechselrichter
Wärme
85-90%
Dampferzeuger
Wärmetauscher
Wärmeverbraucher

Abb. 1.2 Vereinfachtes Verfahrensschema des Hybridsystems

Natürlich müssen die Gründe für die Entscheidung zugunsten einer bestimmten Technik in erster Linie auch wissenschaftlich abgesichert werden. So ist ein durchschnittliches jährliches Verhältnis des Strom- zu Wärmeverbrauchs von ungefähr eins zu zehn für private Haushalte ein wesentliches Kriterium für den Einsatz der Dampfmaschine mit Rücksicht auf deren Wirkungsgrad von etwa 10-15%. Der Einsatz der Dampfmaschine ist dabei hauptsächlich im Winter erforderlich, wohingegen die Photovoltaik im wesentlichen die Sommermonate nutzen soll.

Primär läßt sich mit diesem System aufgrund der Kombination von Photovoltaik mit der Kraft-Wärme-Kopplung in erheblichem Umfang Brennstoff einsparen.

In Zukunft jedoch ist der vermehrte Einsatz von CO_2-neutraler Biomasse anzustreben, welche aus Effizienzgründen möglichst in *fester* Form eingesetzt werden sollte und dies über möglichst kurze Transportwege [1.3]. Damit empfiehlt sich sowohl der Einsatz von dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungssystemen als auch die externe Verbrennung.

Beiden Forderungen kann die Dampfmaschine gerecht werden [1.11].

Zur Erarbeitung der Dimensionierungsgrundlagen des Hybridsystems wird das Verbrauchsverhalten eines privaten Haushalts aufgezeigt und mit den tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung korreliert. Daraus werden die statistisch ableitbaren Einsatzzeiten für die Dampfmaschine bestimmt.

Alle für solch ein System erforderlich erachteten Komponenten wurden zu einem Anlagenkonzept zusammengefügt und dazu ein Verfahrenschema erarbeitet.

Zur Auslegung der Komponenten des Hybridsystems wie Photovoltaikanlage, Dampfmaschine, Wärmetauscher und Energiespeicher ist ebenfalls ein Simulationsprogramm erstellt worden, um sowohl das komplexe Zusammenspiel der Einzelteile, als auch die energetisch ausbilanzierte Gesamtfunktion zu überprüfen.
Das hier vorgestellte System wurde sowohl theoretisch, als auch mit Hilfe eines Versuchsaufbaus experimentell eingehend untersucht, um das für eine praktische Realisierung erforderliche Know How zu systematisieren und zugänglich zu machen.

Primäres Ziel dieser Arbeit ist es, im Rahmen einer Machbarkeitsanalyse die prinzipielle Einsatzmöglichkeit eines solchen Hybridsystems für private Haushalte aufzuzeigen und die technischen Rahmenbedingungen hierfür herauszuarbeiten. Die vorgenommenen experimentellen Aufbauten mit einer "*historischen*" *Dampfmaschine* dienen vorrangig zur Unterstützung dieses Zieles. Damit konnten die mathematisch physikalischen Modellbildungen und Simulationen durch praktische Erfahrungen auf eine solidere Basis gestellt werden.

Als wesentliches *Ergebnis* dieser Untersuchungen wird ein Verfahrensschema und dessen Funktionsprinzip präsentiert, welches als Grundlage für weitergehende Entwicklungen dienen kann, sowie die Dimensionierung eines solchen Hybridsystems aufgezeigt.

Der Aufbau einer auf den Markt abgestimmten "Pilotanlage" eines derartigen Hybridsystems erfordert zunächst die Entwicklung einer "*modernen*" *Dampfmaschine*, und benötigt hierfür die Unterstützung durch heutige Maschinenbauer. Möglicherweise kann diese Arbeit eine Anregung hierfür bieten.

1.7 Gliederung der Arbeit

Nachdem einleitend die Motivation für die Untersuchung eines photovoltaischen Hybridsystems mit einer Dampfmaschine zur Kraft-Wärme-Kopplung dargelegt wurde, folgt zunächst eine Zusammenstellung von Grundlagen und Fakten zum Aufbau von Photovoltaikanlagen.

Anschließend wird die Struktur der derzeitigen Energieversorgung privater Haushalte erläutert und dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung gegenübergestellt. Es werden KWK-Modelle und Aggregate vorgestellt und die Einsatzvoraussetzungen erläutert.

Den Erklärungen zum photovoltaischen Hybridsystem, insbesondere von regenerativen, schließt sich ein Versuch zur Systematisierung solcher Systeme an, gefolgt von Ausführungen zu Einsatzbereichen.

Auf diese mehr vorbereitenden Ausführungen stützen sich die nachfolgenden Kapitel zur systematischen Darlegung der Einsatzmöglichkeit eines Hybridsystems mit Dampfmaschine für private Haushalte.

Hierfür wird zunächst eine repräsentative Energieverbrauchs-Charakteristik eines durchschnittlichen Haushalts herausgearbeitet, sowohl für Strom als auch für Wärme. Damit läßt sich jeweils ein "typischer" auslegungsrelevanter Sommer- und Wintertag darstellen. Daraus resultiert die erforderliche Kenntnis über den Verlauf des zu erfüllenden Strom-Wärme-Verhältnisses.

Nach diesen für den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungen erforderlichen Lastganganalysen wird nach einem kurzen Überblick über die thermodynamischen Grundlagen der Dampfkraftprozeß beschrieben, gefolgt von einer Abhandlung über die Funktionsweise einer Dampfmaschine.

Daran schließen sich die mehr ergebnisorientierten Ausführungen an. Zunächst werden die für das Hybridsystem erforderlichen Komponenten aufgelistet, erläutert und zu einem Verfahrensschema zusammengefügt. Danach wird der in gegenseitiger Abstimmung dazu errichtete Versuchsaufbau dargelegt.

Die grundlegende Funktionsweise der KWK-Anlage wird physikalisch modelliert und somit einer mathematischen Beschreibung zugänglich gemacht. Insbesondere die wechselseitigen Beziehungen zwischen den ausschlaggebenden Parametern werden im Hinblick auf das erzielbare Strom-Wärme-Verhältnis aufgedeckt.

Die ausgearbeiteten Regelungs- und Steuerungs-Vorschläge werden dargelegt und begründet. Hierfür wird die Verhaltensweise des Systems bei gezielten Änderungen der möglichen Einflußgrößen eingehend analysiert und dargelegt. Das Steuerungskonzept beinhaltet die Beschreibung eines möglichen Programmablaufs zum automatischen Betrieb des Hybridsystems.

Das entwickelte Simulationsprogramm rundet die gewonnenen Erkenntnisse soweit ab, daß ein konkrete Dimensionierung eines Hybridsystems für private Haushalte vorgenommen werden kann. Dabei werden die Ganglinien der Haushalts-anforderungen mit dem Energielieferverhalten der Kraft-Wärme-Kopplung und der PV-Anlage korreliert um eine ausreichende Abdeckung zu gewährleisten.

Abschließend gibt eine Zusammenfassung einen Überblick über die wesentlichen Erkenntnisse, Möglichkeiten und Einsatzgrenzen der Hybridsystems, gefolgt von einem Ausblick mit einigen Bemerkungen zu möglichen zukünftigen Entwicklungen.

2. Photovoltaik

In dem folgenden Kapitel werden die wesentlichen physikalischen und technischen Grundlagen der photovoltaischen Stromerzeugung dargestellt, wie sie für das Verständnis und den Aufbau von Photovoltaikanlagen nach dem heutigen Stand der Technik von Bedeutung sind. Die Photovoltaikanlage stellt eine wesentliche Komponente des untersuchten Hybridsystems dar. Abgesehen von einigen grundlegenden Darstellungen sind die hier aufgeführten Zusammenhänge und Fakten mit Rücksicht auf die hierfür im Vordergrund stehende Systemtechnik ausgewählt worden, da sie wichtige Dimensionierungsgrundlagen für den Aufbau eines solchen Systems bilden.

2.1 Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche

Die größte Quelle regenerativer Energie ist bei weitem die Sonne. Diese besteht zu etwa 80% aus Wasserstoff und zu 20% aus Helium. Nur 0,1% besteht aus anderen Elementen. Die Strahlung der Sonne ist Folge von Fusionsprozessen, die Wasserstoff in Helium überführen [2.1].

Außerhalb der Erdatmosphäre zeigt das Sonnenspektrum die Charakteristik eines schwarzen Strahlers mit einer Temperatur von $T = 5762\ K$. Die spektrale Intensitätsverteilung eines derartigen Strahlers wird durch das *Plancksche Strahlungsgesetz* beschrieben :

$$E_n dn = \frac{2hn^3}{c^2\left(\exp(hn / kT) - 1\right)} dn \quad \text{bzw.} \quad E_l dl = \frac{2hc^2}{l^5\left(\exp(hc / lkT) - 1\right)} dl \,. \qquad (2.1)$$

Durch differenzieren nach der Wellenlänge λ kann daraus das *Wiensche Verschiebungsgesetz* gewonnen werden, welches den Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der Wellenlänge im Intensitätsmaximum aufzeigt:

$$l_{\max} T = const = \frac{hc}{4{,}965k} = 2{,}89 \cdot 10^{-3} [mK] \,. \qquad (2.2)$$

Damit ergibt sich der Oberflächentemperatur entsprechend beim Intensitätsmaximum eine Wellenlänge von rund 0,5 μm, welche im sichtbaren Bereich liegt. Die flächenbezogene Strahlungsleistung eines schwarzen Strahlers ergibt sich durch Integration des Strahlungsgesetzes und zeigt eine Proportionalität zur 4. Potenz der Temperatur T:

$$\frac{L}{A} = s \cdot T^4 \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad \text{mit} \quad s = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]. \qquad (2.3)$$

Dies ist das *Stefan-Boltzmann-Strahlungsgesetz* mit der Strahlungskonstante σ.

Für die Sonne bedeutet dies eine Leistung von etwa 64 MW/m². Insgesamt ergibt sich eine abgestrahlte Leistung von $3{,}9 \cdot 10^{26}$ W.

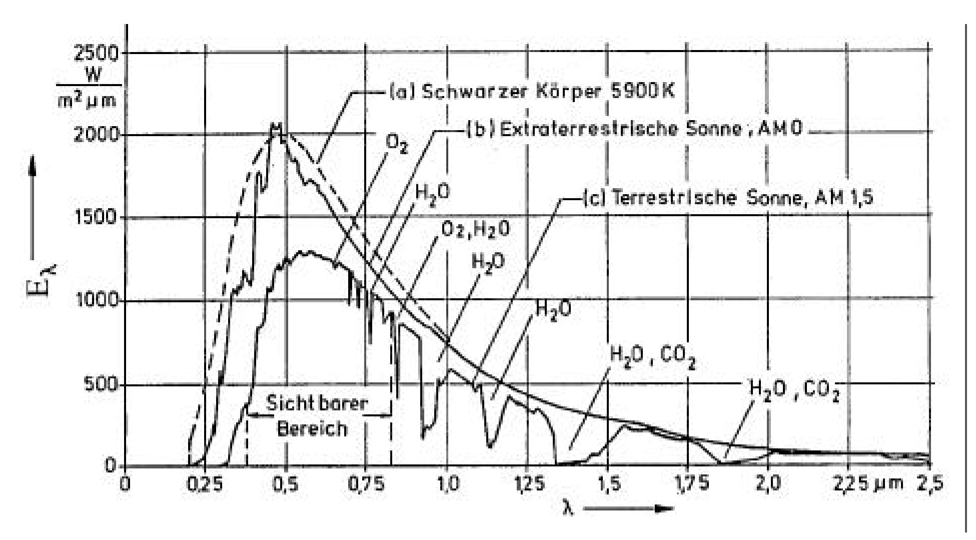


Abb. 2.1 Strahlungsspektrum der Sonne [2.2]

Da der Strahlungsfluß sich auf eine Kugelschale verteilt, nimmt dieser mit dem Abstand zum Quadrat ab und beträgt nach dem mittleren Abstand der Erde von der Sonne von $149{,}5 \cdot 10^{9}$ m außerhalb der Lufthülle, bei senkrechtem Einfall auf eine Ebene:

$$E_0 = 1{,}37 \text{ kW/m}^2. \tag{2.4}$$

Diese Leistung wird durch Absorption und Streuung beim Durchgang durch die Atmosphäre zum Teil geschwächt. Zusätzlich kommt es auch noch zu einer spektralen Verschiebung. So ist die *Rayleigh-Streuung* mit ihrem l^{-4}-Verhalten für die blaue Himmelsfarbe und für das Morgen- und Abendrot verantwortlich. All diese Effekte hängen in ihrem Ausmaß ebenfalls von dem in der Atmosphäre zurückgelegten Weg ab, wie das *Lambert-Beer'sche Gesetz* es beschreibt [2.3]. Diesen kennzeichnet man mit dem sogenannten AM-Wert, welcher von der Sonnenhöhe g_S relativ zur Horizontalen wie folgt abhängt:

$$AM = \frac{1}{\sin g_S}. \tag{2.5}$$

So unterscheidet man grob:

AM0	die extraterrestrische Strahlung (E_0)
AM1	senkrechter Einfall des Sonnenlichts am Äquator auf Meereshöhe
AM1,5	bedeutet eine 1,5- fach größere Luftmasse bei $g_S = 41{,}8°$

Ansonsten haben sowohl die lokalen Wetter- wie Standortbedingungen einen großen Einfluß auf die Zusammensetzung der Strahlung.

Für die Bewertung von Photovoltaikanlagen hat man sich auf einen Standard bezüglich AM1,5 *global* geeinigt [2.2]. Die Bezeichnung global kennzeichnet die Summe aus direkter und indirekter Strahlung. Die mittlere Jahressumme der Globalstrahlung beträgt in Deutschland näherungsweise 1.000 kWh/(m²a). Auf die gesamte Fläche bezogen entspricht dies in der Summe etwa dem Hundertfachen des heutigen Primärenergiebedarfs von Deutschland.

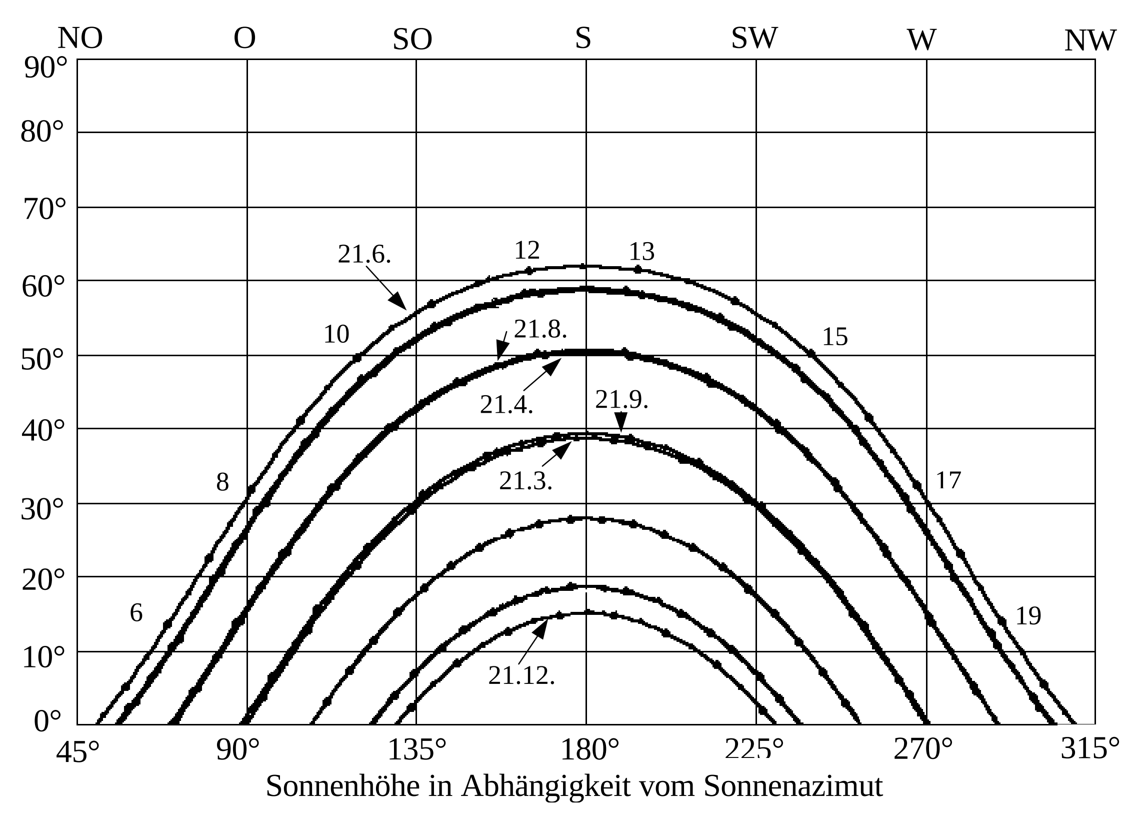


Abb. 2.2 Sonnenstandsdiagramm Hagen 51,5° Nord , 7,5° Ost (SUNDI [1.2])

Die Stärke von diffuser und direkter Strahlung sowie globaler Strahlung ändern sich im sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf. Momentane Schwankungen ergeben sich dann zusätzlich noch aufgrund der stochastisch gegebenen Wetterbedingungen.

Somit ergibt sich die augenblickliche lokale Sonneneinstrahlung aus der Überlagerung des einerseits physikalisch *deterministisch* [2.4] vorgegebenen Sonnenstands und den andererseits *chaotischen* meteorologischen Gegebenheiten [2.5].

kWh/ (m²d)	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
direkt	0,17	0,40	1,03	1,42	2,13	2,58	2,29	2,05	1,38	0,54	0,22	0,10	1,20
diffus	0,44	0,74	1,41	2,07	2,64	2,86	2,97	2,53	1,67	1,05	0,54	0,35	1,61
global	0,61	1,14	2,44	3,49	4,77	5,44	5,26	4,58	3,05	1,59	0,76	0,45	2,81

Tabelle 2.1 mittlere tägl. direkte, diffuse und globale Strahlung, (1966-75) Berlin [2.6]

Die von der Sonne kommende Strahlungsenergie kann direkt genutzt werden oder indirekt über die natürlichen Wandlungsprozesse wie zum Beispiel in Form von Windenergie oder Biomasse. Die direkte Nutzung der Sonnenenergie erfolgt im wesentlichen sowohl thermisch als auch photovoltaisch. Da hierfür in der Regel Vorrichtungen auf geneigten Ebenen eingesetzt werden, ist die Einstrahlung entsprechend des Orientierungs- und Neigungswinkels modifiziert. Außerdem ergeben sich noch zusätzliche Strahlungsanteile, die aufgrund von Reflexionsvorgängen in der Umgebung entstehen. Die *direkte* Bestrahlungsstärke auf einer Ebene wird maximal, wenn die Sonnenstrahlen senkrecht auf die Ebene einfallen. Diese Tatsache kann zur Optimierung des Energieertrags genutzt werden. Im folgenden wird die Wandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie mit Hilfe von Photovoltaikanlagen betrachtet.

2.2 Photovoltaischer Effekt

Eine besonders elegante Methode elektrischen Strom zu erzeugen, besteht in der Nutzung des inneren lichtelektrischen Effekts, welcher die direkte Wandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie ermöglicht, ohne die Kopplung über mechanisch bewegte Teile. Entdeckt wurde dieser sogenannte photovoltaische Effekt durch *Becquerel* im Jahre 1839, die technische Nutzung wurde aber erst entscheidend durch die Satellitentechnik vorangetrieben [2.7].

Im Gegensatz zum äußeren lichtelektrischen Effekt, bei dem Elektronen aus der Oberfläche eines bestrahlten Körpers herauslösen, bewirkt der innere lichtelektrische Effekt ein energetisches Anheben der Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband. Dieser Effekt ist in bestimmten Festkörpern, den Halbleitern, zur Stromerzeugung nutzbar. Dies geschieht in sogenannten Solarzellen.

Damit eine elektrische Spannung entsteht und dadurch ein elektrischer Strom induziert werden kann, sind einige Bedingungen erforderlich:

- der Festkörper muß Strahlung absorbieren
- durch die Absorption entstehen freie Ladungsträger
- ein inneres elektrisches Feld im Halbleiter trennt die Ladungsträger
- an der Ober- und Unterseite der Zelle müssen elektrische Kontakte zur Stromabnahme angebracht sein

Eine der Grundvoraussetzungen der Solarzelle ist also das Vorhandensein eines inneren elektrischen Feldes, welches durch eine Sperrschicht erzeugt wird.

Diese Sperrschicht sollte sich unmittelbar unterhalb der Oberfläche der Solarzelle befinden. Über die Sperrschicht und dem damit verknüpften inneren elektrischen Feld werden die Ladungsträger nach ihrer Entstehung durch die Absorption eines Photons getrennt [2.8].

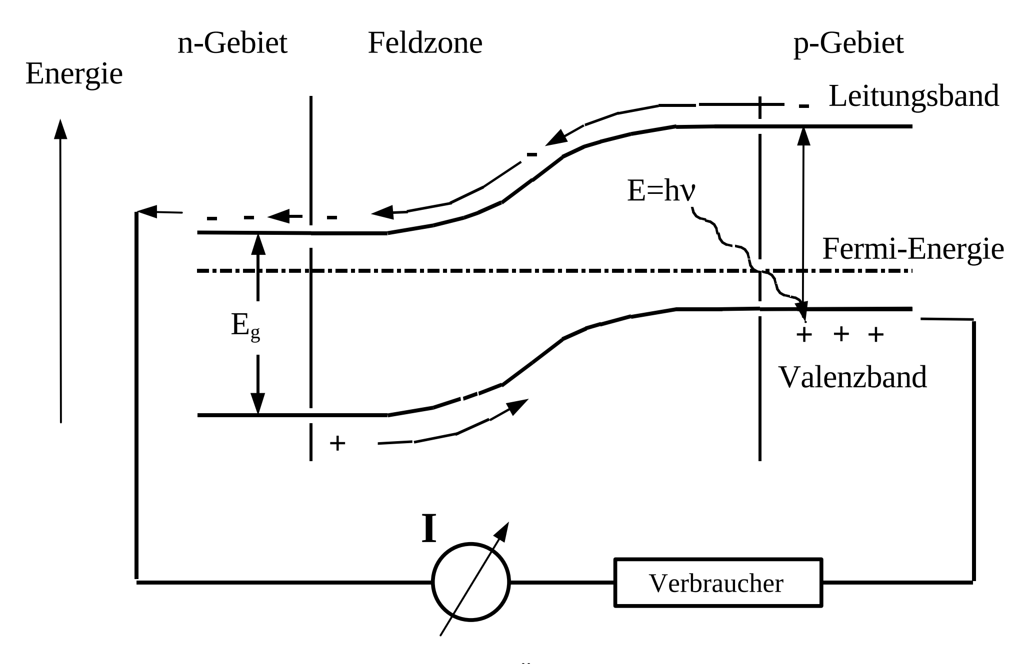


Abb. 2.3 Energiebändermodell des PN-Übergangs von Solarzellen-Grenzschichten

Auf eine tiefergehende Beschreibung der komplexen physikalischen Grundlagen des photovoltaischen Effekts kann hier nicht eingegangen werden, da hier die damit verbundene Systemtechnik im Vordergrund steht. Hierfür sei auf das vielfältige Angebot entsprechender Spezialliteratur verwiesen.

2.3 Die Komponenten eines PV-Systems und Stand der Technik

Solarzellen können aus verschiedenen Halbleiterwerkstoffen aufgebaut werden. Dabei wird bisher Silizium (Si) am häufigsten verwendet. Mit diesem Werkstoff lassen sich monokristalline, polykristalline Zellen und amorphe Dünnschichtzellen herstellen.

Die aktuelle Solarzellen-Forschung befaßt sich zur Zeit unter anderem mit der Erhöhung des Wirkungsgrades und der Langzeitstabilität, sowie mit alternativen Halbleitermaterialien, der Minimierung des Materialeinsatzes und mit effektiveren Produktionsmethoden [2.8],[2.9],[2.17].

2.3.1 Solarzelle

Im unbeleuchteten Zustand hat die Solarzelle die elektrischen Eigenschaften einer großflächigen Diode, wie die Darstellung mit Hilfe der Strom-Spannungskennlinie zeigt. Im beleuchteten Zustand liefert die Solarzelle einen Strom, der in entgegengesetzter Richtung zum Diodendunkelstrom fließt [2.10].

Die Darstellung dieser Kennlinien erfolgt hier im Erzeugerzählpfeilsystem.

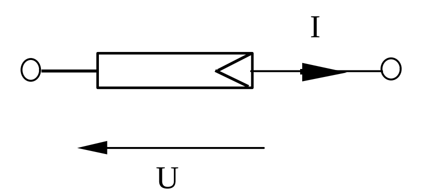


Abb. 2.4 Schaltsymbol der Solarzelle und Zählpfeile

Aufgrund des Erzeugerzählpfeilsystems erscheint die vom Verbraucherzählpfeilsystem gewohnte Diodenkennlinie gespiegelt an der U-Achse.

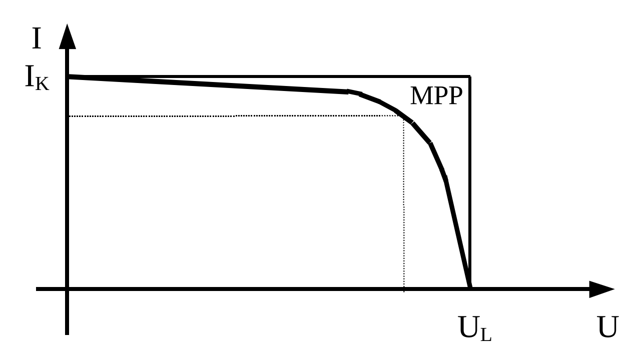


Abb. 2.5 Typische U-I-Kennlinie einer Solarzelle

Leistungsabgabe der Solarzelle erfolgt nur beim Betrieb im 1. Quadranten. Betriebszustände im 2. und 4. Quadranten sind energieverbrauchend und können infolge der damit verbundenen Wärmeentwicklung zur Zerstörung der Solarzelle führen. Diese Zustände sind bei ungünstigen Umständen in Reihen- oder Parallelschaltungen von Solarzellen möglich. Um Zerstörungen zu verhindern, ist durch Schaltungsmaßnahmen dafür Sorge zu tragen, daß der Betriebspunkt innerhalb des thermisch zulässigen Bereichs bleibt. Insbesondere darf bei negativ anliegender Spannung die Durchbruchsspannung nicht erreicht werden. Diese ist verglichen mit der Sperrfähigkeit von Leistungshalbleiterdioden sehr gering und liegt bei Solarzellen aus kristallinem Silizium im Bereich von ca. -15 V.

Eine ausreichend gute Beschreibung für ein grundlegendes Verständnis der Solarzelle erlaubt das sogenannte Eindiodenmodell. Hierbei werden in einem erweiterten Ersatzschaltbild der Spannungsabfall vom Halbleiter zu den externen Kontakten durch den Serienwiderstand R_S und die Leckströme längs der Kanten der Solarzelle durch einen Parallelwiderstand R_P eingeführt [2.7].

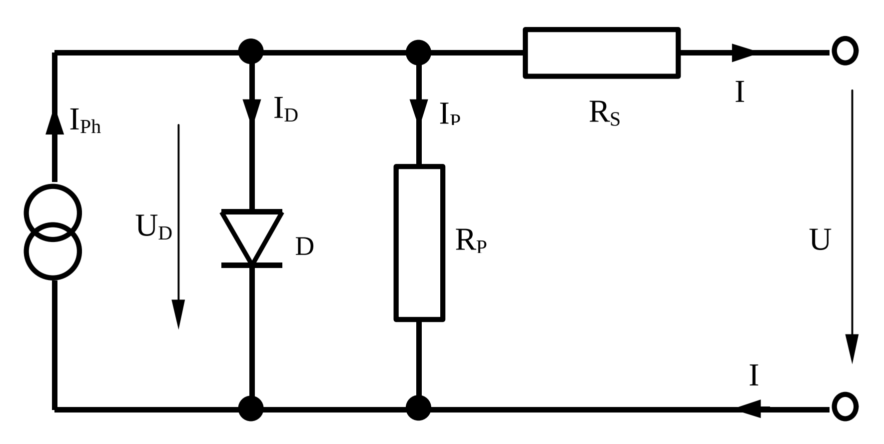


Abb. 2.6: Ersatzschaltbild Eindiodenmodell

Daraus läßt sich die folgende Gleichung für die I-U-Kennlinie einer Solarzelle herleiten

$$I = I_{Ph} - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_S}{m \cdot U_T} \right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} . \qquad (2.6)$$

Die beteiligten Parameter haben dabei folgende Bedeutung:

I_S	Sättigungsstrom in Diodensperrichtung
m	Diodenfaktor
U, I	Solarzellenklemmspannung bzw. Strom
U_D, I_D	Diodenspannung bzw. -strom
U_T	Temperaturspannung, $U_T = kT/e$; $U_T = 25{,}7\,mV$ bei 25°C.

Die Stromquelle erzeugt einen Photostrom I_{Ph}, der in erster Linie von der Bestrahlungsstärke abhängig ist:

$$I_{Ph} = c_0 \cdot E \qquad (2.7)$$

c_0	Koeffizient des Photostroms	$[c_0] = \frac{m^2}{V}$
E	Bestrahlungsstärke der Zelle	$[E] = \frac{W}{m^2}$.

Da es sich bei der obigen Gleichung um eine implizite Funktion handelt, kann sie nicht direkt nach I oder U aufgelöst werden, sondern nur mit Hilfe numerischer Methoden.

Zur vereinfachten Betrachtung kann man den Widerstand R_S gleich Null setzten und den Parallelwiderstand R_P als unendlich groß betrachten.

Damit ergibt sich dann für das *vereinfachte Ersatzschaltbild*:

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{m \cdot U_T} \right) - 1 \right). \tag{2.8}$$

Diese Gleichung gestattet eine einfachere Berechnung, liefert aber keine optimale Darstellung der elektrischen und physikalischen Verhältnisse der Solarzelle.

Sollte das Eindiodenmodell für spezielle Betrachtungen in seiner Genauigkeit noch nicht ausreichen, so läßt sich durch Einführung einer zweiten Diode parallel zur ersten eine weitere Verbesserung erzielen, schon allein deshalb, weil sich dadurch die Anzahl der variierbaren Parameter erhöht [2.9].

Neben dem erläuterten Zusammenhang zwischen Strom und Spannung einer Solarzelle gibt es noch andere Parameter, welche für den praktischen Einsatz sowie deren technische Bewertung und Verständnis von Solarzellen gebräuchlich und sinnvoll sind [2.2], [2.11].

Bei Kurzschluß der Solarzelle ist die Klemmenspannung Null und es fließt der Kurzschlußstrom I_K, der näherungsweise recht gut dem Photostrom I_{Ph} entspricht:

$$I_K \approx I_{Ph} = c_0 \cdot E. \tag{2.9}$$

Dieser Kurzschlußstrom wird üblicherweise bei Normaltemperatur ($J = 25°C$) angegeben. Die Temperaturabhängigkeit des Kurzschlußstroms kann über den Temperaturkoeffizienten a_{IK} angegeben werden zu:

$$I_K(J_2) = I_K(J_1) \cdot \left(1 + a_{IK} \cdot (J_2 - J_1)\right). \tag{2.10}$$

Der Temperaturkoeffizient a_{IK} liegt bei Silizium in der Regel zwischen $+10^{-4}/°C$ und $+10^{-3}/°C$.

Im Leerlauf fließt kein Strom und an den Klemmen liegt die Leerlaufspannung U_L an. Zur *qualitativen Beschreibung* kann hier die Gleichung der vereinfachten Ersatzschaltung herangezogen werden und mit $I = 0$ nach U_L aufgelöst werden:

$$U_L = m \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_K}{I_S} + 1 \right). \tag{2.11}$$

Aufgrund der Abhängigkeit des Kurzschlußstroms von der Bestrahlungsstärke gilt für die Leerlaufspannung bei diesen Vereinfachungen näherungsweise:

$$U_L \propto \ln(E). \tag{2.12}$$

Mit der Simulation durch das Eindiodenmodell kann eine sehr gute Übereinstimmung mit Meßwerten erreicht werden. Die Differenzen liegen überwiegend im Bereich der erzielbaren Meßgenauigkeit. Selbst mit dem vereinfachten Ersatzschaltbild sind maximale relative Abweichungen von 4% und durchschnittliche relative Abweichungen von 1,2% erreichbar [2.16].

Die Temperaturabhängigkeit der Leerlaufspannung kann analog zum Kurzschlußstrom, allerdings mit negativem Koeffizienten dargestellt werden.

Bei Silizium-Solarzellen liegt der Koeffizient a_{UL} zwischen $-5 \cdot 10^{-3}/°C$ und $-3 \cdot 10^{-3}/°C$, so daß die Leerlaufspannung schneller mit der Temperatur sinkt, als der Kurzschlußstrom ansteigt.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der sogenannte 'Maximum Power Point' (MPP), der Betriebspunkt mit der maximalen Leistungsabnahme. Dort hat die Leistungs-Spannungskennlinie sein Maximum. Die dazugehörige Spannung sei U_{MPP} und der Strom I_{MPP}. Dabei gilt sowohl $U_{MPP} < U_L$ als auch $I_{MPP} < I_K$. Für die Temperaturabhängigkeiten dieser Werte gilt das gleiche wie für die Leerlaufspannung und den Kurzschlußstrom. Die Leistung P_{MPP} im MPP berechnet sich zu:

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} < U_L \cdot I_K . \tag{2.13}$$

Da für die Temperaturabhängigkeit das Produkt der Koeffizienten für Strom und Spannung zum Tragen kommt, ergibt sich für die Leistung ein negativer Koeffizient a_{PMPP}, welcher für Silizium zwischen $-6 \cdot 10^{-3}/°C$ und $-3 \cdot 10^{-3}/°C$ liegt. So sinkt zum Beispiel die Leistung bei einer Temperaturerhöhung von 25°C um ca. 10%.

Als weiteres Qualitätsmerkmal gilt der Füllfaktor (FF), der im Prinzip die Abweichung der U-I-Kennlinienform von einem Rechteck darstellt, welches durch die Leerlaufspannung und den Kurzschlußstrom definiert wird. Damit steht der Füllfaktor in einem engen Zusammenhang zum Wirkungsgrad h der Solarzelle:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_L \cdot I_K} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_L \cdot I_K} \tag{2.14}$$

$$h = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A} = \frac{FF \cdot U_L \cdot I_K}{E \cdot A} \tag{2.15}$$

bei einer Beleuchtungsstärke E und der Solarzellenfläche A.

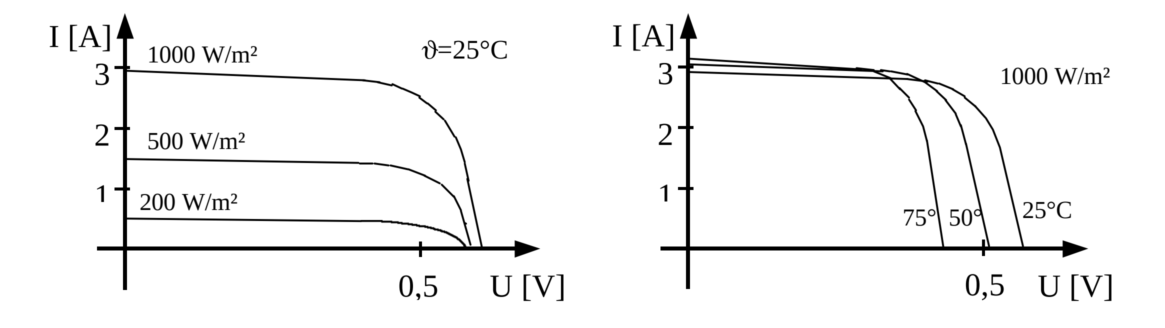


Abb. 2.7 U-I-Kennlinien von kristallinen Si-Solarzellen

Der Wirkungsgrad wird meist bei Standardtestbedingungen (STC) angegeben. Diese lauten:

$$E = 1000\frac{W}{m^2}\ ,\ J = 25°C \text{ und } AM1{,}5 \text{ bei senkrechtem Strahlungseinfall.} \qquad (2.16)$$

Die unter diesen Bedingungen zu erwartende Leistung ist meist höher als die unter natürlichen Bedingungen und wird deshalb mit der Einheit *Wp* für Watt-peak als Spitzenleistung gekennzeichnet. Mit realen c-Silizium-Solarzellen aus der Produktion erreicht man derzeit bei diesen Bedingungen einen Wirkungsgrad von 13...15%.

2.3.2 PV-Module

Um die verfügbare Ausgangsspannung auf ein brauchbares Niveau zu heben, werden die Solarzellen vor allem in Serienschaltung miteinander verschaltet zu einem Modul. Da zahlreiche Anwendungen für den Betrieb mit 12V Bleiakkumulatoren konzipiert werden, hat sich die hierfür optimale Zahl von 36 bis 40 als eine der gebräuchlichen Standardzahlen durchgesetzt. Es können aber je nach Zielsetzung weniger oder deutlich mehr sein [2.10].

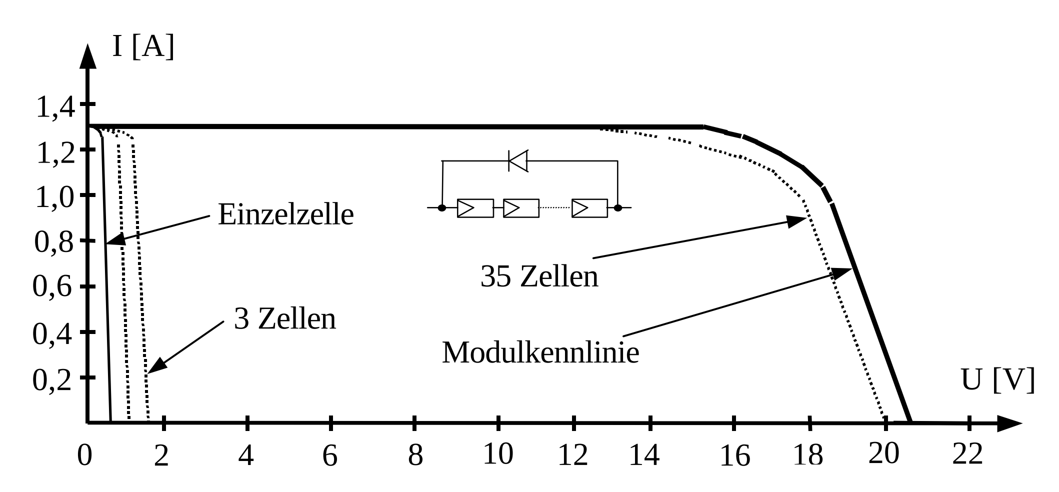


Abb. 2.8 U-I-Kennlinien bei Serienschaltung mit 36 gleichen Zellen

Bei der Reihenschaltung erhält man dementsprechend für den Strom und die Spannung die folgenden Beziehungen:

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = ... = I_n \quad \text{und} \quad U = \sum_{i=1}^{n} U_i \quad \text{bzw.} \quad U = n \cdot U_i \qquad (2.17)$$

falls alle Zellen identisch sind.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie der Reihenschaltung läßt sich demnach wie oben dargestellt für die Reihenschaltung von Solarzellen relativ einfach zusammensetzen, insbesondere bei identischen Zellen.

Bypassdioden parallel zu einer Solarzellenreihe (Abb. 2.8) schützen vor der thermischen Zerstörung oder vor sogenannten Hotspots, dies sind kleine heiße Bereiche, in denen das Zellmaterial oder die Zelleinkapselung wegschmelzen kann. Ursache hierfür sind Abschattungen auf einem Modul, die ohne Bypass aufgrund der Serienschaltung der Zellen zu einer negativen Spannung an einzelnen Solarzellen führen und damit Verlustleistung erzeugen würden.

In diesem Fall übernimmt dann die Diode den Stromfluß. Aus wirtschaftlichen Gründen werden allerdings nur Bypassdioden über Stränge von 18 bis 24 Zellen geschaltet, so daß kein hundertprozentiger Schutz gegeben ist. Die Diode schaltet bei einer kleinen negativ anliegenden Spannung von etwa -0,7V durch, je nach Diodentyp. In diesem Fall fällt die Energieproduktion der gesamten überbrückten Gruppe aus.

Aufgrund der niedrigen Betriebsspannung einer Solarzelle sind Parallelschaltungen für einzelne Solarzellen, bedingt durch die damit ebenfalls verbundenen hohen Ströme und Leitungsverluste, für die meisten technischen Anwendungen nicht sinnvoll.

Sinnvoll ist es häufig in *Solargeneratoren* einige Reihenschaltungen von Solarmodulen parallel zu schalten. Auch hier sind die Reihen in der Regel mit Bypassdioden versehen. Die Modulreihen selbst können auch durch in Reihe geschaltete Strangdioden geschützt werden. Nachteilig dabei sind allerdings die dabei auftretenden Verluste bei relativ geringem Schutzeffekt, weshalb häufig darauf verzichtet wird.

Der von Herstellern angegebene Wirkungsgrad von Solarmodulen ist niedriger als der Zellenwirkungsgrad, da bei einem Modul ein zusätzlicher Flächenbedarf zwischen den Zellen und für den Rand besteht, der inaktiv ist. Daraus ergibt sich ein Modulwirkungsgrad, der um etwa 1-2%-Punkte niedriger liegt als bei den Zellen.

Amorphe SI-Dünnschichtzelle	Polykristalline SI-Solarzelle	Monokristalline SI-Solarzelle
3 - 6 %	8 - 11,5%	10 - 13,5%

Abb. 2.2 Modulwirkungsgrade (Stand 1998)

Um die Solarmodule nun als Lieferanten elektrischer Energie zu nutzen, muß eine Last damit betrieben werden. Dies geschieht meist in der Art, daß viele Solarmodule zu einem sogenannten Solargenerator zusammengeschaltet werden. Hierbei ergibt sich durch die Anzahl der in Reihe geschalteten Module je Strang die Ausgangsspannung, die zur Speisung der angeschlossenen Last dient. Die entnehmbare Leistung des Solargenerators wird dann durch die Anzahl der parallelen Stränge festgelegt.

2.3.3 PV-Anlage

Man kann Photovoltaikanlagen grob in zwei Klassen einteilen. Dies sind zum einen Inselanlagen und zum anderen netzgekoppelte Anlagen. Des weiteren können Anlagen mit und ohne Energiespeicher unterschieden werden.

Von größerer praktischer Bedeutung sind jedoch hauptsächlich Inselanlagen mit Speicher und netzgekoppelte Anlagen ohne Speicher [2.12]. Eine Inselanlage ist eine Stromversorgungsanlage, die einen oder mehrere Verbraucher unabhängig von einem Stromnetz mit Energie versorgt. Als Speicher finden dabei heute noch fast ausschließlich Bleiakkumulatoren Verwendung. Bei netzgekoppelten Anlagen übernimmt das Stromnetz den Momentanausgleich zwischen Energieangebot und -nachfrage. Bei den folgenden Systembeschreibungen sollen Anlagen betrachtet werden, die ausschließlich auf die Versorgung privater Haushalte abzielen.

Meist muß der photovoltaisch erzeugte Strom in geeigneter Form aufbereitet werden, um ihn einem Verbraucher oder Speicher zuführen zu können. Die folgenden schematischen Darstellungen zeigen die Systemkomponenten und deren Einbindung für Inselanlagen sowie für eine Netzankopplung [2.13].

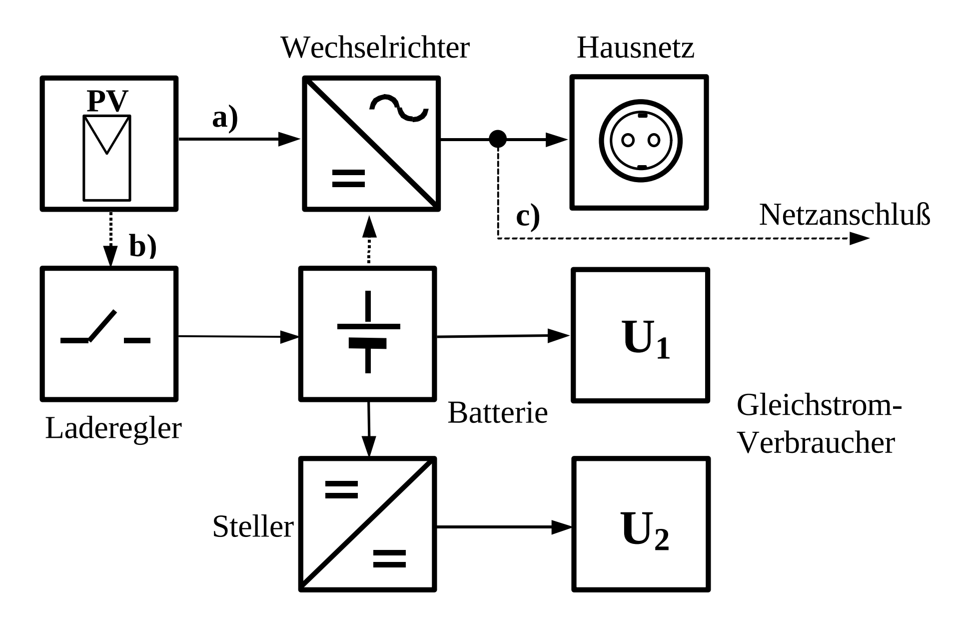


Abb. 2.9 PV-Anlagen-Schema mit Komponenten für [a)] , [a)+c)] oder [b)]
{ a) ohne b) mit Speicher , c) mit Netzanbindung }

Mit Rücksicht auf den derzeitigen Stand der Technik der Stromverbraucher privater Haushalte, stellt die Inselanlage im Hinblick auf die erforderlichen Komponenten eine Obermenge zur netzgekoppelten Variante dar. Somit ist die Netzanbindung im Prinzip eine Systemvereinfachung. Deshalb sollen im folgenden die Komponenten eines Inselsystems beschrieben werden.

Die hierfür erforderlichen Komponenten sind im wesentlichen der aus den Solarmodulen zusammengesetzte *Solargenerator*, ein *Laderegler*, möglicherweise *Gleichspannungswandler*, *MPP-Tracker*, ein *Akkumulator* und ein *Wechselrichter*. Die wesentlichen Eigenschaften dieser Systemkomponenten [2.10] werden im folgenden kurz beschrieben:

- *Solargenerator:*

Ein Solargenerator ist eine Zusammenschaltung von Solarmodulen. Dabei werden die Module in Reihe zu einem Strang geschaltet, um die gewünschte Gleichspannung zu erreichen. Je nach gewünschter Leistung können mehrere dieser Stränge parallel geschaltet werden. Im Prinzip gilt für den Solargenerator das gleiche, wie bei der Verschaltung von Solarzellen zu einem Modul.

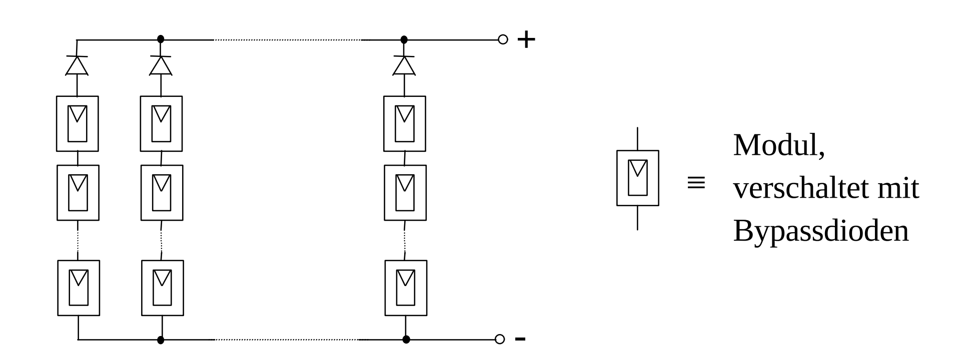


Abb. 2.10 Solargenerator

- *Akkumulator:*

Begriffe und Bestimmungen für den Umgang mit Akkumulatoren ('elektrochemische Sekundärelemente') finden sich in VDE 0510/DIN 57510 sowie in DIN 40729.
Um größere Mengen elektrischer Energie zu speichern, werden heutzutage bevorzugt Bleiakkumulatoren eingesetzt. In diesen läuft folgende chemische Bruttoreaktion ab:

$$PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4 \longleftrightarrow 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O.$$

Beim Entladen verläuft die Reaktion von links nach rechts, und beim Ladevorgang entsprechend umgekehrt. Die Nennspannung einer Zelle beträgt 2 V.
Meist werden 6 Zellen in Reihe geschaltet, um eine Betriebsspannung von 12 V zu erreichen. Da das Verhalten des Akkumulators durch die ablaufenden chemischen Reaktionen geprägt ist, sind die Kennwerte eines Bleiakkumulators sind von der Temperatur abhängig.

Zum Aufladen der Batterie muß mehr Energie aufgewandt werden, als bei der Entladung erhalten werden kann.

Bei dem sich daraus ergebende Ladewirkungsgrad wird zwischen dem Ah-Wirkungsgrad h_{Ah} und dem Wh-Wirkungsgrad h_{Wh} unterschieden:

$$h_{Ah} = \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} = -\frac{\int_0^{t_{ab}} I \cdot dt}{\int_0^{t_{zu}} I \cdot dt} \quad \text{und} \quad h_{Wh} = \frac{Q_{ab} \cdot U_{ab}}{Q_{zu} \cdot U_{zu}} = -\frac{\int_0^{t_{ab}} U \cdot I \cdot dt}{\int_0^{t_{zu}} U \cdot I \cdot dt}. \tag{2.18}$$

Da die Ladespannung höher ist als die Entladespannung, ist der Wh-Wirkungsgrad stets um etwa 10% niedriger als der Ah-Wirkungsgrad, der je nach Batterietyp bei einem Bleiakkumulator zwischen 80% und 95% beträgt. Zusätzliche Verluste entstehen durch Selbstentladung, die den Systemwirkungsgrad weiter verschlechtern und mit der Temperatur steigen.

Die entnehmbare Kapazität ist vom Entladestrom abhängig. Je höher dieser ist, desto geringer ist die entnehmbare Ladung.

Photovoltaik-Batterien werden normalerweise zyklisch geladen (bei Sonnenschein) und entladen (bei Nacht und Schlechtwetter). Die Zyklenlebensdauer ist definiert als die Anzahl der möglichen stattfindenden Zyklen, bis die nutzbare Kapazität auf 80% der Nennkapazität abgesunken ist. Diese Zyklenlebensdauer hängt stark von der Zyklentiefe ab. Die Zyklentiefe gibt an, zu wieviel Prozent der Nennkapazität der Akkumulator entladen wird.

Anhand der Spannung bei Standardbedingungen kann der Ladezustand eines Akkumulators gemäß den folgenden Tabellenwerten bestimmt werden:

Spannungsbereich	Ladezustand
größer als 15 V	Ladung unterbrechen, Batterie voll
13,5 V ... 14,1 V	normaler Spannungsbereich bei Ladung ohne Verbraucherlast
12,0 V ... 14,1 V	normaler Spannungsbereich bei Ladung mit Verbraucherlast
11,5 V ... 12,7 V	normaler Spannungsbereich bei Entladung
11,0 V	Abschalten der Verbraucher, Ladung veranlassen

Tabelle 2.3 Betriebszustände eines 12 V Blei-Akkus

Es ist wichtig, die Batterie vor Überladung und Tiefentladung zu schützen. Insbesondere führt die Tiefentladung zur Bildung von kristallinem Bleisulfat, das die Wiederaufladung stark behindert, da es sich nur schlecht und unvollständig umwandelt. Dadurch nimmt der Akkumulator dauerhaft Schaden.

Ein Überschreiten der Ladegrenzspannung führt zur Zersetzung des Elektrolyten, wobei Knallgas entsteht. Fortgesetztes starkes Gasen kann dem Akkumulator schaden, wohingegen eine Gasung in gewissen Zeitabständen erforderlich sein kann, da dadurch eine regelmäßige Durchmischung des Elektrolyten ermöglicht wird. Aufgrund der Knallgasbildung ist der Batterieraum gut zu durchlüften.

Mit der Knallgasbildung ist ein Wasserverlust verknüpft, der durch regelmäßiges Nachfüllen mit destilliertem Wasser kompensiert werden muß. Bei größeren Systemen kann auch eine Elektrolytumwälzung mit einer Pumpe sinnvoll sein [2.15].

- *Laderegler:*

Die gebräuchlichsten Lademethoden sind in DIN 41772 genormt. So kann zum Beispiel mit konstantem Strom oder mit gleichbleibender Spannung geladen werden. Kombinierte Ladeverfahren lassen sich mit Hilfe sogenannter I- und U-Lader realisieren. Bei manchen Anwendungen wird der Ladestrom auch pulsförmig zugeführt [2.2].

Für den Einsatz in photovoltaischen Systemen und dem damit verbundenen ständig schwankenden Leistungsangebot ist ein Verfahren vorzuziehen, das den Ladevorgang in möglichst kurzer Zeit durchführt und eine möglichst vollständige Ladung ermöglicht. Deshalb eignet sich hier das kombinierte Verfahren nach der iu-Kennlinie. Dabei wird zunächst mit einer Strombegrenzung bis zum Erreichen der Ladegrenzspannung aufgeladen, und die weitere Ladung erfolgt dann mit Spannungsbegrenzung (d.h. zunächst konstanter Strom, dann konstante Spannung).

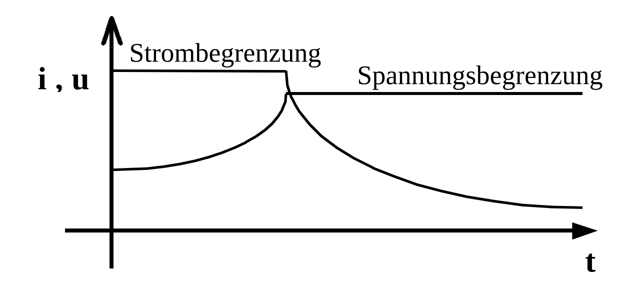


Abb.2.11 Ladevorgang mit IU-Kennlinien-Verlauf

Der Laderegler dient nun zur Führung des Ladevorgangs entlang der vorgegebenen iu-Kennlinie. Dabei wird die Kennlinie als 'Sollwertvorgabe' in geeigneter Form dem Regler zur Verfügung gestellt. Wichtig ist, wie bereits erwähnt, der Schutz vor Überladung und Tiefentladung. Zu diesem Zweck muß durch den Laderegler entweder der Ladevorgang gestoppt werden oder die Verbraucher sind teilweise oder komplett von der Batterie zu trennen.

Bei kleineren Systemen genügt es in der Regel, den Laderegler als einfachen Serien- oder Parallelregler auszuführen, wobei der Parallelregler am weitesten verbreitet ist [2.12]. Der Parallelregler schließt den Solargenerator bei voll geladenem Akkumulator kurz, der Serienregler hingegen trennt in diesem Falle die Verbindung zur Batterie und beendet somit den Ladevorgang. Zum Schutz vor einer Tiefentladung werden in beiden Fällen die Verbraucher vom Akkumulator getrennt.

Die Ladespannung von Bleiakkumulatoren fällt mit steigender Temperatur.

Das Aufladen ist in einem Temperaturbereich von etwa -30°C bis +50°C möglich. Entladen werden kann dagegen die Batterie oberhalb von etwa -45°C.

- *Gleichspannungswandler:*

Im Gegensatz zu kleinen Anlagen, ist bei größeren Anlagen für Inselversorgungen eine Spannungsanpassung von Batterie und Solargenerator im MPP mit Hilfe eines Gleichstromstellers sinnvoll. Hierbei wird der Steller vom MPP-Regler angesteuert.

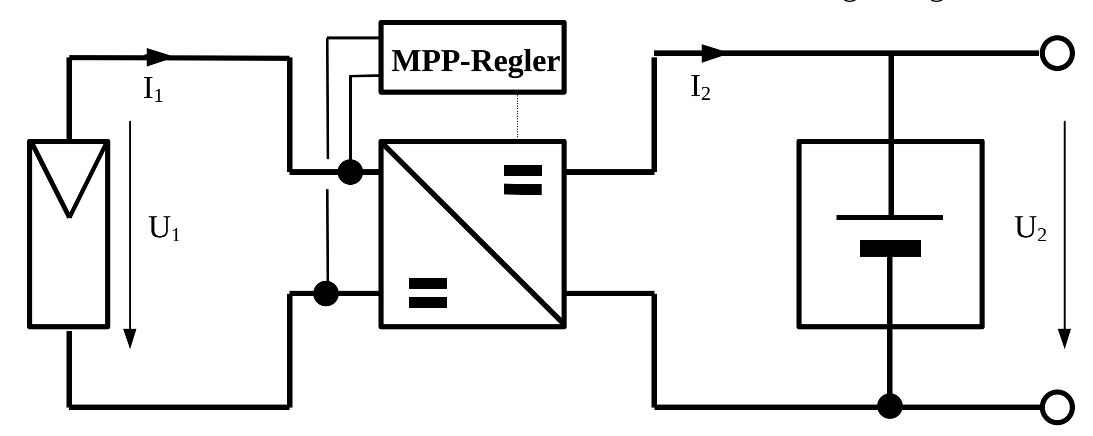


Abb. 2.12 Gleichstromsteller für eine Inselanlage

Mit Rücksicht auf die Ladegrenzspannung der Batterie kann die Ausgangsspannung des Stellers begrenzt werden. Eine mögliche übergeordnete System-Regelung könnte dem Gleichstromsteller einen Arbeitspunkt vorgeben, der durch einen MPP- und Laderegler bestimmt wird [2.14]. Dies könnte insbesondere bei Hybridsystemen mit zusätzlichem Stromerzeuger zur gegenseitigen Abstimmung sinnvoll sein [2.10].

Je nach den jeweils auf den aneinander anzupassenden Spannungsniveaus des Solargenerators (Eingangsspannung) und der Batteriespannung (Ausgangsspannung) werden Drosselwandlerschaltungen nach dem Tiefsetz- oder Hochsetzstellerprinzip eingesetzt. Die Spannung des Solargenerators muß natürlich auf die gewählte Systemspannung abgestimmt werden. Sie muß mindestens ausreichen, um die Batterie voll aufladen zu können.

Die üblichen Wirkungsgrade der Steller liegen bei 90% bis zu 98%. Die besten Wirkungsgrade erzielt man bezüglich des Verhältnisses von Ausgangs- zu Eingangs-spannung für Tiefsetzsteller bei 0,5 bis 1 und für Hochsetzsteller bei 1 bis 2.

Die damit verbundenen Verluste müssen den auftretenden Verlusten bei fehlender Anpassung an den MPP gegenübergestellt werden. Aus diesem Grund verzichtet man bei kleineren Anlagen auf den Gleichstromsteller und der damit verbundenen MPP-Regelung, zumal sich bei der direkten Kopplung des PV-Generators mit dem Akkumulator in der Regel ein guter Arbeitspunkt einstellt, auch bei Variation der Einstrahlung. In diesem Fall reicht eine einfache Laderegelung aus [2.2].

- *MPP-Tracker:*

Die zuvor erläuterten Spannungswandler ermöglichen es, am Solargenerator eine andere Spannung einzustellen als an dem Verbraucher. Dadurch gelangt man unabhängig von der momentanen Belastung in die Nähe des MPP, wenn man idealen Betrieb voraussetzt.

Abgesehen von starken Einflüssen durch Abschattungen, die mehrere relative Leistungsmaxima zur Folge haben können, hat die Temperatur den größten Einfluß auf den optimalen Arbeitspunkt. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den momentanen MPP automatisch zu erfassen und die Spannungsverhältnisse darauf einzuregeln.

Dies kann der sogenannte MPP-Tracker leisten. Hierbei kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, wie sensorgesteuerte Regelung, Regelung mit Hilfe einer Referenzzelle, Suchschwingverfahren, Nulldurchgangsverfahren, Methode der differenziellen Änderung oder das Kennlinienverfahren.

Sind mehrere lokale Leistungsmaxima möglich, ist es sinnvoll, die U-I-Kennlinie spannungsgesteuert linear innerhalb eines Spannungsintervalls durchzufahren und die gemessenen Leistungen zu speichern. Dann wird der Arbeitspunkt auf das absolute Leistungsmaximum eingestellt. Zusätzlich können dann noch Schwankungen um diesen gefundenen Punkt ausgeregelt werden.

- *Wechselrichter:*

Wenn durch das Inselsystem auch Wechselstromverbraucher versorgt werden sollen, muß der vom Solargenerator gelieferte Gleichstrom in Wechselstrom oder Drehstrom gewandelt werden [2.14]. Bei Netzanbindung ermöglicht dieses Element ebenfalls die Einspeisung von überschüssiger Energie ins öffentliche Netz.

Man unterscheidet hier netzgeführte und selbstgeführte Wechselrichter. Erstere benötigen einen Blindleistungsbezug aus dem Netz aufgrund des Schaltverhaltens der eingesetzten Thyristoren. Selbstgeführte Wechselrichter hingegen können aufgrund des Einsatzes abschaltbarer Leistungshalbleiter ein eigenständiges Inselnetz speisen.

Als Bauelemente im Leistungsteil der selbstgeführten Wechselrichter kommen Leistungshalbleiter wie MOSFET, Bipolartransistor, IGBT oder GTO zum Einsatz. Auf schaltungstechnische Details kann hier nicht eingegangen werden. Hierfür sei auf die vielfältige Spezialliteratur verwiesen. Wird ein Wechselrichter dieses Typs an ein vorhandenes Energieversorgungsnetz angeschlossen, ist eine Synchronisation mit dem Netz mittels einer Synchronisationsschaltung erforderlich.

Aufgrund des wechselnden Strahlungsangebots der Sonne wird der Wechselrichter oft im Teillastbereich gefahren. Daher ist es wichtig, daß der Wirkungsgrad auch dabei hohe Werte erreicht. Der Wechselrichter sollte nicht zu groß dimensioniert sein, bezogen auf die Solargenerator-Leistung (etwa 85%). Ein minimaler Eigenverbrauch ist anzustreben, was durch eine Nachtabschaltung unterstützt werden kann.

Zum Vergleich von Wechselrichtern mit Rücksicht auf die durchschnittlichen Strahlungsverhältnisse in Mitteleuropa kann der sogenannte 'Euro-Wirkungsgrad' herangezogen werden [2.11], der wie folgt definiert ist:

$$h_e = 0{,}03 \cdot h_{5\%} + 0{,}06 \cdot h_{10\%} + 0{,}13 \cdot h_{20\%} + 0{,}1 \cdot h_{30\%} + 0{,}48 \cdot h_{50\%} + 0{,}2 \cdot h_{100\%}\,. \qquad (2.19)$$

Der Euro-Wirkungsgrad eines speziell für PV-Randbedingungen entwickelten Wechselrichters beträgt etwa 90%.

Der reale Energieertrag einer Photovoltaikanlage kann wie folgt ermittelt werden:

$$P_{real} = PR \cdot P_{ideal} = PR \cdot A_{PV} \cdot h_{PV} \cdot E_{Solar} \qquad (2.20)$$

mit den Parametern P_{ideal} idealer Energieertrag, A_{PV} Photovoltaik-Fläche, h_{PV} Photovoltaikwirkungsgrad, E_{Solar} Bestrahlungsstärke und PR als Performance Ratio.

Der Photovoltaikwirkungsgrad ergibt sich aus der Wirkungsgradkette und kann für monokristalline Si-Solarzellen abschätzungsweise in etwa mit 10% angesetzt werden. Der Zusammenhang zwischen realem und idealem Energieertrag kann mit Hilfe der sogenannten Performance Ratio PR beschrieben werden. Damit werden auch alle sonstigen Verluste berücksichtigt. Ein guter Rechnungswert für die Auslegung von netzgekoppelten Anlagen ist eine Performance Ratio von 0,75.

Bei einer 30° nach Süden geneigten 10 m² großen Fläche, einem Photovoltaikwirkungsgrad von 10% und einer Bestrahlungsstärke von 1100 kWh/(m²a) ergibt sich ein idealer Energieertrag von 1100 kWh/a. Für den realen Energieertrag erhält man dann 825 kWh/a. Der Faktor PR erreicht bei sehr guten Anlagen einen Wert von 0,8 oder mehr, und bei schlechten Anlagen sind auch Werte unter 0,6 möglich [2.11].

2.4 Einsatzweise von Photovoltaikanlagen

Für den Wohnbereich, Firmengebäude oder öffentliche Einrichtungen werden heutzutage meist netzgekoppelte Photovoltaikanlagen im Leistungsbereich von 0,75 kWp bis 5 kWp betrieben. Für den Autonombetrieb findet man derzeit Inselsysteme von 10 Wp bis 4 kWp im Einsatz.

Der Aufbau des Modulfeldes kann dabei auf vielfältige Art und Weise erfolgen. Eine Integration in Gebäude kann durch eine Dach-oder Fassadenmontage erfolgen. Besteht diese Möglichkeit nicht, so ist der Aufbau auf Freiflächen oder Tragmasten eine Alternative. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Montagetechnik. Zu berücksichtigen sind hierbei insbesondere die statischen Verhältnisse, die Windlast und mögliche Abschattungen [2.16].

In Mitteleuropa ist eine Neigung des PV-Generators von etwa 30° bei Südausrichtung optimal im Hinblick auf einen maximalen Jahresenergieertrag. Bei Abweichungen bis ± 50° nach Ost oder West beziehungsweise bis ± 20° Neigung ergeben sich Energieverluste von unter 5%. Dies verdeutlicht ein unkritisches Verhalten bezüglich der Ausrichtung.

Legt man allerdings besonderen Wert auf einen bestimmten Energieertrag im Winter, wie es für autonome Systeme der Fall sein kann, so ist ein Neigungswinkel von 50°... 90° vorteilhaft.

Befindet sich der Wechselrichter direkt zwischen dem PV-Generator und dem Verbraucher (oder Netzanbindung), so ist für das Nennleistungsverhältnis des Wechselrichters zum PV-Generator ist ein Wert von 0,8 - 0,9 zu empfehlen [2.15].

Wird der Wechselrichter über eine Batterie versorgt, ist für die Auslegung des Wechselrichters die maximale Leistungsanforderung der Verbraucher entscheidend. Bei autarken Systemen kann bei optimaler Ankopplung der Batterie je nach Betriebsführung eine Energieausbeute von 95% und mehr erreicht werden.

Zur weiteren Steigerung des Energieertrages ist eine Nachführung des PV-Generators entsprechend des momentanen Sonnenstands denkbar, wenn dies die gegebenen Montagemöglichkeiten erlauben. Allerdings sind hierbei der zusätzliche konstruktive Aufwand, sowie der Eigenenergieverbrauch und die erhöhte Störanfälligkeit dagegen abzuwägen. Der dadurch mögliche Mehrertrag ist auch abhängig von dem örtlichen Anteil an Direkteinstrahlung [2.12].

Zu einer differenzierteren Abschätzung des Energieertrages können die DIN-Normen oder verfügbare meteorologische Daten [2.18] herangezogen werden. So liefert DIN 5034 Teil 2 "Tageslicht in Innenräumen" die Grundlagen zur Sonnenstandsberechnung und Beleuchtungsstärke sowie Begriffsdefinitionen.

Für die Aufstellung von PV-Anlagen in Deutschland ist DIN 4710 "Meteorologische Daten" zu empfehlen. Darin sind Daten zum Bestrahlungsstärken-Verlauf sowohl in Abhängigkeit vom Monat, als auch stundenweise im Verlauf eines Tages aufgeführt. Hierfür wurden die Mittelwerte über mindestens 5 Jahre für verschiedene repräsentative deutsche Städte herangezogen. Auf diese Norm stützt sich auch die Dimensionierung der PV-Anlage für das in dieser Arbeit vorgestellte Hybridsystem.

Als Beispiel für den Ertragsverlauf einer PV-Anlage seien hier die Ergebnisse der 4,8 kWp Photovoltaikanlage der FernUniversität in Hagen während des Jahres 1997 dargestellt. Der Gesamtertrag des Jahres betrug etwa 4000 kWh. Zur besseren Übertragbarkeit auf andere Anlagengrößen ist es sinnvoll, die Erträge auf ein kWp zu normieren, wie in Abb. 2.13 dargestellt.

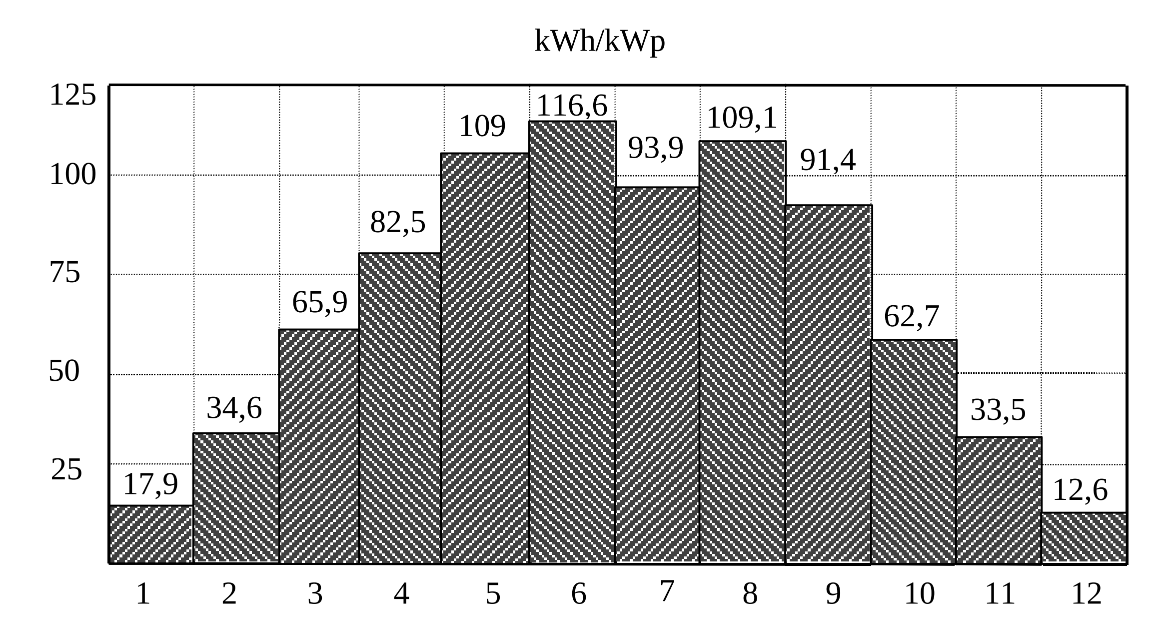


Abb. 2.13. Energieproduktion der 4,8 kWp-Anlage der *FernUniversität in Hagen*

3. Kraft-Wärme-Kopplung

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Energieversorgung privater Haushalte, sowie über die Grundlagen und Möglichkeiten der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zur Verfügung stellen.

3.1 Energieversorgung privater Haushalte

Der Energiebedarf privater Haushalte wird sowohl durch die genutzten elektrischen Geräte als auch durch den Warmwasserverbrauch und dem insbesondere im Winter erforderlichen Heizungsbetrieb bestimmt. Hierbei erfolgt in der Regel die Lieferung von elektrischer Energie unabhängig von der Versorgung mit Wärmeenergie.

Abgesehen von Wasserkraftwerken, wird derzeit der elektrische Strom in der Regel mit Hilfe des *Wasserdampf-Kreislaufs* über den Antrieb von Turbinen erzeugt, welche ihrerseits die damit erzeugte mechanische Energie an Generatoren zur Stromerzeugung weitergeben. Die bei diesem Prozeß anfallende Kondensationswärme wird dabei im allgemeinen ungenutzt in die Umwelt entlassen[3.1].

Der aktuelle Beitrag, den die Nutzung von Wind- und Sonnenenergie *in der Summe* leistet, ist im Vergleich zu den oben genannten Prozessen noch sehr bescheiden und deshalb noch vernachlässigbar [3.2].

Bei der Energieversorgung hat die elektrische Energie einen besonderen Stellenwert, da sie leicht zu transportieren ist, einfach zu verteilen und problemlos und sauber genutzt werden kann. Da der Energiebedarf in den Sommermonaten geringer ist als im Winter und ebenfalls tageszeitlichen Schwankungen unterliegt, muß die Stromerzeugung dem augenblicklichen Bedarf ständig angepaßt werden. Da die elektrische Energie in großen Mengen nicht direkt speicherbar ist, setzt dies eine ausreichende Kraftwerksreserve voraus.

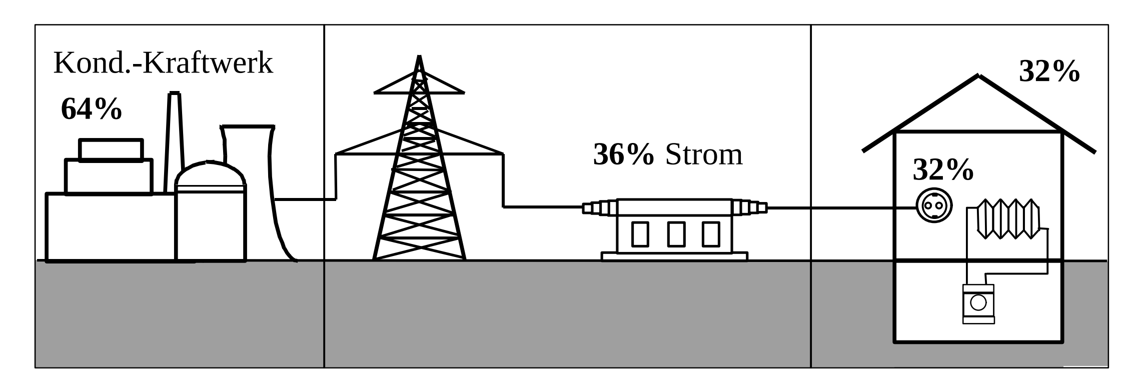


Abb. 3.1 Stromversorgung mit Kondensationskraftwerk (% - Primärenergie)

Die hierfür erforderliche Vorausschätzung der Belastung und Aufstellung eines darauf beruhenden Einsatzplans für die Kraftwerke übernehmen die *Lastverteiler* der EVUs.

Hierbei sind sowohl die Vorhersagen des Wetterdienstes als auch die Verhaltensgewohnheiten der Bevölkerung zu berücksichtigen [3.3].

Eine sich daraus ergebende Tagesbelastungskurve läßt sich in drei Bereiche Grundlast, Mittellast und Spitzenlast aufteilen. Die Ausnutzungszeit beträgt in etwa bei Grundlastkraftwerken 5000-7000 h/a, bei Mittellastkraftwerken 4000 h/a und bei Spitzenlastkraftwerken 1000 h/a.

Aufgrund der Tatsache, daß die Elektrizitätserzeugung (ohne KWK) in Großkraftwerken wirtschaftlich und ökologisch besser ist als in Kleinkraftwerken, werden zur *reinen* Stromerzeugung derzeit meist große Einheiten im Bereich von 600 bis 1300 MW eingesetzt, die zur besseren Erfüllung der Lastganglinien im Verbundbetrieb arbeiten.

Dieser Verbund wird durch ein zusammenhängendes Versorgungsnetz gewährleistet. Dieses elektrische Energieversorgungsnetz übernimmt sowohl den Ausgleich der Kraftwerke untereinander als auch den Transport der Energie zum Verbraucher [3.2].

Es besteht aus einer komplexen Zusammenschaltung von Betriebsmitteln wie Leitungen und Transformatoren sowie Schaltanlagen zur Kopplung unterschiedlicher Spannungsebenen. Hierbei unterscheidet man je nach Funktion zwischen Übertragungs- und Verteilernetzen. Die Übertragungsnetze mit den in Deutschland üblichen Nennspannungen von 110 kV, 220 kV und 380 kV leiten den Strom vom Erzeuger zu den Verbraucherzentren. Die Nennspannungen der für die Versorgung der Hausanschlüsse zuständigen Verteilernetze betragen 0,4 kV, 10 kV, 20 kV und 110 kV. In einem Netzverbund ist es sinnvoll, galvanisch zusammenhängende Einheiten als Netz zu definieren, die dann durch Transformatoren miteinander gekoppelt sind. Die Netze sind grundsätzlich als 3-Phasen-Drehstrom-Systeme ausgeführt. In Europa liegt die Netzfrequenz üblicherweise bei 50 Hz, in anderen Ländern sind auch 60 Hz im Einsatz. Um im Niederspannungsnetz die weltweit genormte Wechselspannung von $400/\sqrt{3} = 230V$ bereitzustellen, benötigt man noch den Neutralleiter als vierten Leiter. In einigen Ländern u.a. den USA sind auch 110 V festgelegt.

Die durch diese Art des Energietransports auftretenden Verluste betrugen 1997 in Deutschland 4,4% [3.4].

Diese Ausführungen lassen erahnen, welcher Problematik man sich in diesem Zusammenhang beim Aufbau eines zukünftigen rein *regenerativen* Stromversorgungssystems stellen muß, welches ja naturgemäß mehr auf dezentrale Erzeugungs-Strukturen angewiesen ist.

Die Wärmeerzeugung für private Haushalte geschieht meist mit individuellen Brennern ohne KWK. Als Brennstoff findet dabei vorrangig Erdgas und Erdöl Verwendung.

Es besteht somit in der Regel keine Möglichkeit, die bei der Stromerzeugung in den Kraftwerken anfallende Wärme für Heizzwecke zu verwenden.

Dies liegt zum einen an der räumlichen Trennung von Erzeuger und Verbraucher und dem damit verbundenen Aufwand zum verlustarmen Wärmetransport, und zum anderen kann in den Sommermonaten nicht auf die volle Kühlleistung im Kraftwerk verzichtet werden.

3.2 Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung

Unter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) versteht man die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer und thermischer Nutzenergie aus anderen Energieformen mittels eines thermodynamischen Prozesses in *einer* technischen Anlage [3.5]. Die hierbei freigesetzte mechanische Arbeit wird in der Regel unmittelbar in elektrische Energie umgewandelt. Somit ergibt sich dann ein sinnvoller der Einsatz von KWK-Anlagen, wenn eine überwiegend gleichzeitige Nachfrage sowohl für Strom als auch für Wärme zur Verfügung steht. Bei der Betriebsführung von KWK-Anlagen unterscheidet man folgende Betriebsarten:

a) Stromorientierter Betrieb
Die elektrischen Bedarfswerte sind hierbei sowohl für die Auswahl, als auch für die Auslegung und den Betrieb ausschlaggebendes Kriterium. Dies bedingt dann möglicherweise ein Minderangebot an Wärme, die im Bedarfsfall separat zur Verfügung gestellt werden muß.

b) Wärmeorientierter Betrieb
Hierbei sind die thermischen Bedarfswerte sowohl für die Auswahl, als auch für die Auslegung und den Betrieb ausschlaggebend. Folglich ist dabei mit einer Fehlanpassung bei der Versorgung mit elektrischem Strom zu rechnen, welche im Bedarfsfall mit Hilfe eines Netzanschlusses oder durch den Einsatz von Akkumulatoren ausgeglichen werden muß.

c) Wechsel zwischen strom- und wärmeorientiertem Betrieb
Dieser Betriebsweise wird nur in Ausnahmefällen realisiert und ist in der Regel durch gravierende Änderungen im Verbraucherverhalten bedingt. Diese Art der Anpassung, an die den beiden umschaltbaren Betriebszuständen entsprechenden Lastanforderungen, stellt erhöhte Anforderungen an die Meß- und Regeleinrichtungen sowie die Überwachung.

Für die Versorgung privater Haushalte mit Hilfe *photovoltaischer Hybridsysteme mit KWK* sind diese Unterscheidungen bei deren Auslegung und Betriebsweise von Bedeutung. Denn der jahreszeitliche Wechsel zwischen Sommer, Winter und Übergangszeiten bedingt starke Änderungen im Verbraucherverhalten.

Die Betriebsführung der Kraftmaschine (hier Dampfmaschine) muß diesen Verhältnissen gerecht werden. Diese Hybridsysteme lassen sich somit eher der Betriebsart c) zuordnen. Der jeweils erforderliche Betriebszustand muß durch die System-Steuerung erkannt und ausgelöst werden. Das in dieser Arbeit vorgestellte Steuerungskonzept für ein PV-Hybridsystem mit Dampfmaschine zur Kraft-Wärme-Kopplung verdeutlicht diese erforderlichen Betriebszustands-Umschaltungen, wobei eine *klare* Differenzierung nach jeweils einer der beiden Betriebszustände nicht möglich ist.

In Anlehnung an die drei grundsätzlich unterscheidbaren Betriebszustände können Wirkungsgrade definiert werden, die eine Bewertung der Arbeitsweise ermöglichen. Also ergeben sich die folgenden Wirkungsgraddefinitionen:

i) *Elektrischer Wirkungsgrad*

$$h_{elektrisch} = \frac{elektrische \quad Wirkleistung}{Brennstoffwärmeleistung} \tag{3.1}$$

ii) *Thermischer Wirkungsgrad*

$$h_{thermisch} = \frac{thermische \quad Leistung}{Brennstoffwärmeleistung} \tag{3.2}$$

Für die Bewertung des gesamten Prozesses faßt man diese zum Gesamtwirkungsgrad zusammen:

iii) *Gesamtwirkungsgrad*

$$h_{gesamt} = \frac{elektrische \quad Wirkleistung + thermische \quad Leistung}{Brennstoffwärmeleistung} \Rightarrow$$

$$h_{gesamt} = h_{elektrisch} + h_{thermisch} \,. \tag{3.3}$$

Eine weitere wichtige und nützliche Kenngröße ist die sogenannte *Stromkennzahl*. Diese ist wie folgt definiert:

iv) *Stromkennzahl*

$$s = \frac{elektrische \quad Wirkleistung}{thermische \quad Leistung} \,. \tag{3.4}$$

Die KWK-Anlage sollte nun so betrieben werden können, daß eine Variation und Anpassung der Stromkennzahl bei möglichst hohem Gesamtwirkungsgrad erfolgen kann, um allen wechselnden Belastungsfällen und Anforderungen der Verbraucher gerecht zu werden. Da auf diese Art und Weise der Brennstoff optimal genutzt wird, sind Gesamtwirkungsgrade um 90% möglich.

3.3 Blockheizkraftwerke und Heiz-Kraft-Anlagen

Die naheliegendste Möglichkeit, die anfallende Wärme von Kraftwerken zu nutzen besteht darin, sie über entsprechende Rohrleitungen als "*Fernwärme*" zum Verbraucher zu transportieren. Dieses Prinzip hat jedoch einige systembedingte Nachteile. Dazu gehören zum einen die Wärmeverluste in den Leitungen, sowie die Energieverluste zur Überwindung der Strömungs-Druckverluste als auch die durch den baulichen Aufwand entstehenden Kosten.

Zudem reicht die Abnahme der Wärmemenge auf diese Art, wie bereits oben erwähnt, meist im Sommer nicht aus, um die für den Kraftwerksbetrieb erforderliche Kühlleistung zu gewährleisten. Aus diesen Gründen ist diese Lösung nur in Spezialfällen wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll einsetzbar. Dazu gehört zum Beispiel die Bereitstellung industrieller Prozeßwärme an nahegelegene Betriebe mit einer entsprechend hohen und relativ kontinuierlichen Abnahme.

KWK-Anlagen, die mit Turbinen betrieben werden, erzeugen elektrische Energie überwiegend im Megawatt-Leistungsbereich und werden daher zur zentralen Wärmeversorgung eingesetzt. Diese Kraftwerke werden auch als Heizkraftwerke (HKW) bezeichnet und versorgen häufig größere Gebäudekomplexe wie öffentliche und kommunale Einrichtungen mit Wärme [3.6]. Ebenso können große Industrieanlagen sowohl mit Strom als auch mit Wärme gleichzeitig versorgt werden. Eine derartige Kraft-Wärme-Kopplung hat zwar eine Reduktion des elektrischen Wirkungsgrades zur Folge, dafür ergibt sich aber ein hoher Gesamtnutzungsgrad.

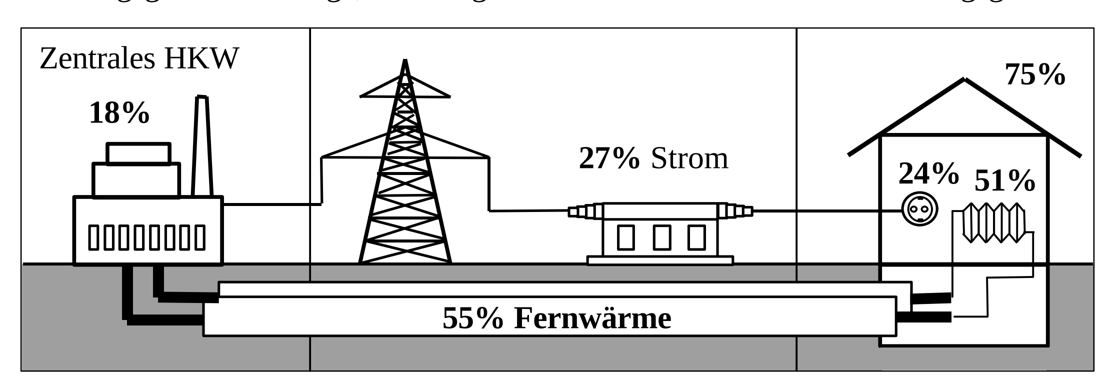


Abb. 3.2 Zentrales HKW mit Fernwärme (% - Primärenergie)

Um Kraftwärmekopplung flächendeckender einsetzen zu können, bieten sich kleinere dezentrale Einheiten an, die verbrauchernah stationiert werden, um übermäßig lange Leitungsführungen zu vermeiden. Bei diesen dezentralen Einheiten handelt es sich um sogenannte Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Heizkraftanlagen (HKA). Blockheizkraftwerke werden vorwiegend mit Otto- oder Dieselmotoren betrieben.

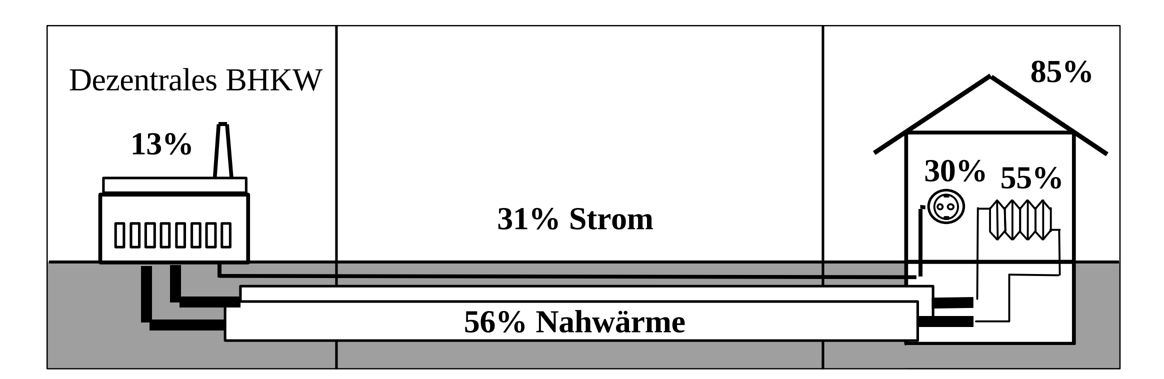


Abb. 3.3 Dezentrales BHKW (% - Primärenergie)

In der Regel sind BHKW modular aufgebaut und werden stromgeführt betrieben. Aufgrund der Wärmetransport-Verluste treten hierbei aber immer noch Einbußen in der Effektivität der Wärmenutzung auf. Vorteilhafter sind in dieser Hinsicht kleine kompakte Heizkraft-Anlagen (HKA), welche direkt in einer Vielzahl von Häusern eingesetzt und von Handwerksbetrieben installiert werden können. In diesem Fall entfällt der Aufbau eines separaten Wärmeverteilsystems.

KWK-Anlagen sind in einem Leistungsbereich von einigen kW bis zu einigen hundert MW elektrischer Grundleistung verfügbar, wobei der Haupteinsatzbereich bisher zwischen etwa 100 kW und 30 MW elektrischer Leistung liegt. Seit der Einführung der BHKW-Technik in den 70er Jahren ist die Anzahl der installierten Anlagen stetig gestiegen. So waren im Jahr 1996 rund 2200 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 1260 MW in Betrieb. Davon waren etwa 23% der Anlagen mit insgesamt 200 MW in der Hand von Kommunen, Privaten oder Betreibergesellschaften [3.7]. Neuere Entwicklungen beschäftigen sich mit dem Einsatz von HKA im Heizungskeller privater Haushalte [3.8]. So werden zum Beispiel mit einem Verbrennungsmotor für Erdgas- oder Erdölbetrieb ausgestattete Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 5 kW und einer thermischen Leistung von 12 kW getestet und angeboten [3.9]. Diese HKA gestatten im Rahmen der Wärmeerzeugung eine zusätzliche Stromerzeugung und somit eine bessere Ausnutzung der Primärenergie.

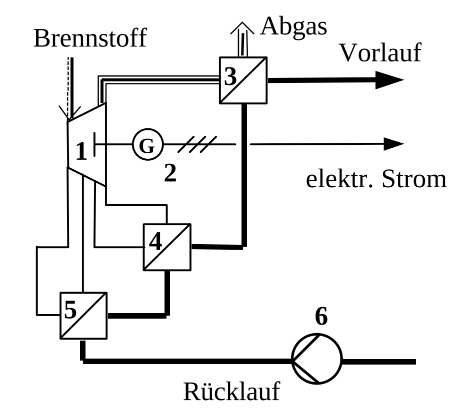
3.4 KWK-Aggregate

Im folgenden werden einige Aggregate zur Realisierung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen vorgestellt [3.5], ohne dabei einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Die ebenfalls zu diesem Themenkomplex gehörenden Wärmepumpen werden nicht behandelt.

Bei der KWK kann man prinzipiell nach Anlagen mit interner [3.10] oder externer Verbrennung unterscheiden:

i) ***KWK mit interner Verbrennung***

- **Dieselmotor - Verfahren**
- **Ottomotor - Verfahren**



1 : Otto- / Dieselmotor

2 : Generator

3 : Abgas - Wärmetauscher

4 : Kühlwasser - Wärmetauscher

5 : Schmieröl - Wärmetauscher

6 : Umwälzpumpe zur Wärmeversorgung

Abb. 3.4 Prinzipschema Otto-/Dieselmotorenanlage

Beim Otto-Verfahren wird ein Gas-Luft-Gemisch verdichtet und zur Zündung gebracht, während beim Diesel-Verfahren Dieselkraftstoff (Heizöl EL) zur Zündung eingespritzt wird. In BHKW mit Dieselmotoren wird heute das sogenannte Gas-Diesel-Verfahren genutzt, bei dem das Anlassen und Abschalten des Motors im reinen Dieselbetrieb erfolgt.

Der laufende Betrieb erfolgt hingegen dann mit einem Brenngas-Luftgemisch (z.B. Erdgas und Luft). Dies nennt man einen Zweibrennstoffbetrieb. Als Brennstoff werden für diese beiden Verfahren vornehmlich Erdgas, Flüssiggas, Deponiegas, Klärgas und Diesel-/Heizöl eingesetzt.

Wirkungsgrade bei Nennlast (%)	Gas-Otto-Motor-aggregat	Gas-Diesel-Motor-aggregat	Diesel-Motor-aggregat
elektr. Wirkungsgrad	30 - 36	32 - 38	34 - 40
therm. Wirkungsgrad	55 - 53	48 - 46	44 - 42
Gesamtwirkungsgrad	85 - 89	80 - 84	78 - 82

Tabelle 3.1 Übersicht Motorenanlagen-Wirkungsgrade (VDI 2067)

Der typische Leistungsbereich dieser Motoren liegt bei 50 - 2000 kW. Die Vorlauftemperatur für die Wärmeverbraucher beträgt etwa 90 - 95°C. Die Wirkungsgrade sind in der Regel günstiger als bei Gasturbinen.

Einen Sonderfall der internen Verbrennung als nicht-thermisches Verfahren stellt die Kraft-Wärme-Kopplung mit Hilfe der

- **Brennstoffzelle**

dar. Diese Technologie ist allerdings noch nicht ganz der Test- und Versuchsphase entwachsen. Brennstoffzellen sind galvanische Elemente, die mit Hilfe von Wasserstoff und Sauerstoff Strom erzeugen [3.11]. Dies ist im Grunde die Umkehrung einer Elektrolyse. Hierbei wird der Wasserstoff häufig über einen vorgeschalteten Gasreforming-Prozeß erzeugt. Die einzige derzeit auf dem Markt erhältliche, für BHKW geeignete Brennstoffzelle ist die Phosphorsaure-Brennstoffzelle (PAFC), welche hierfür in der Regel mit Erdgas und Luft bei einer Betriebstemperatur von 200°C Strom mit einem Wirkungsgrad von etwa 40% erzeugt. Andere Brennsoffzellen-Typen und deren Anwendung in KWK-Anlagen sind noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase. Ein gemeinsames Problem aller derzeitigen Brennstoffzellen ist noch ihre vergleichsweise niedrige Lebensdauer.

ii) ***KWK mit externer Verbrennung***

- **Gasturbinenanlagen mit nachgeschalteten Abhitzekesseln**

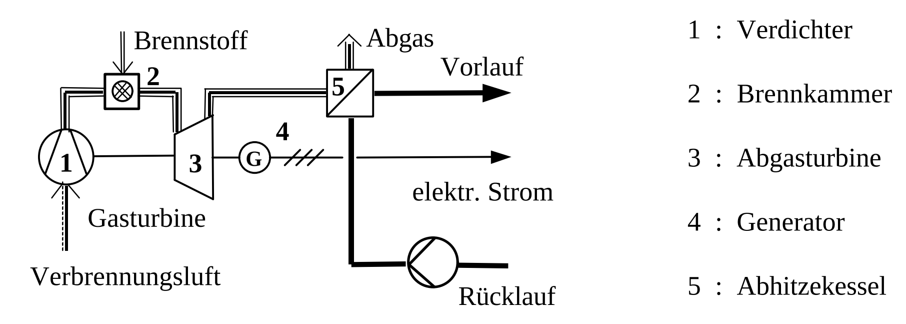


Abb. 3.5 Prinzipschema Gasturbinen-KWK

Für die Verbrennung können gasförmige und flüssige Brennstoffe in die Brennkammer der Turbine eingespritzt werden. Die Schadstoffemissionen sind in der Regel insgesamt so niedrig, daß keine Abgasreinigung erforderlich ist. Erdgas als Energieträger weist zudem die niedrigste spezifische CO_2 Freigabe / kWh auf. Aufgrund des hohen Abgastemperaturniveaus kann Wärme im gesamten technisch relevanten Temperaturbereich zur Verfügung gestellt werden.

Derzeit erfolgt bei den Gasturbinen-Projekten ein Trend weg von den großen Anlagen bis etwa 230 MW hin zu elektrischen Aggregateleistungen im Bereich zwischen 1,5 und 10 MW [3.5].

Wirkungsgrade bei Nennlast (%)	Heizölbetrieb	Erdgasbetrieb
elektr. Wirkungsgrad	17 - 31	17 - 32
therm. Wirkungsgrad	59 - 48	63 - 52
Gesamtwirkungsgrad	76 - 79	80 - 84

Tabelle 3.2 Gasturbinen-Wirkungsgrade (VDI 2067)

- **Gas- und Dampfturbinenanlagen (GuD-Anlagen)**

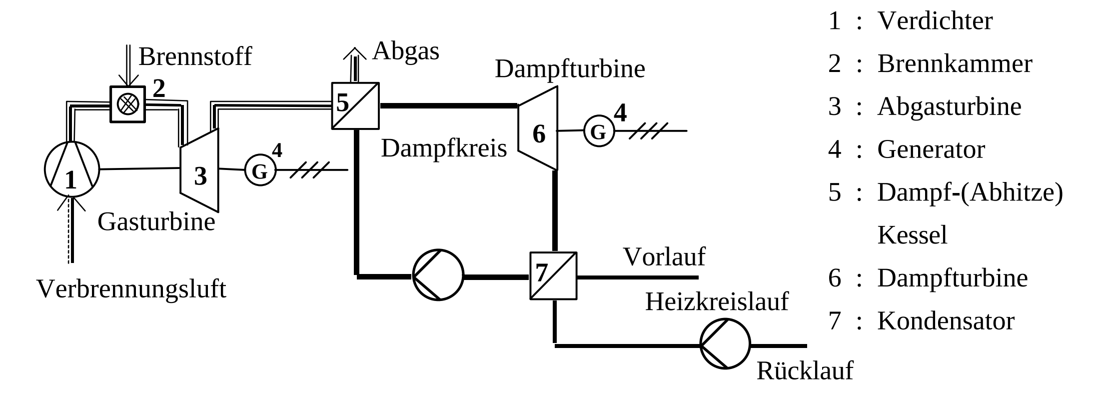


Abb. 3.6 Prinzipschema GUD-KWK-Anlage

Gasturbinen, die für den GuD-Prozeß eingesetzt werden, arbeiten mit Abgastemperaturen bis 1100°C [3.5]. Diese Abgase werden direkt in einen Abhitzekessel geleitet, der den Dampf für eine nachgeschaltete Dampfturbine erzeugt. Dadurch werden elektrische Wirkungsgrade von bis zu 60% möglich und der Gesamtwirkungsgrad läßt sich auf bis zu 90% steigern.

- **Heizkraftwerke mit Dampfkesseln und Dampfturbinen**
- **Heizkraftwerke mit Dampfkesseln und Dampfmotoren**

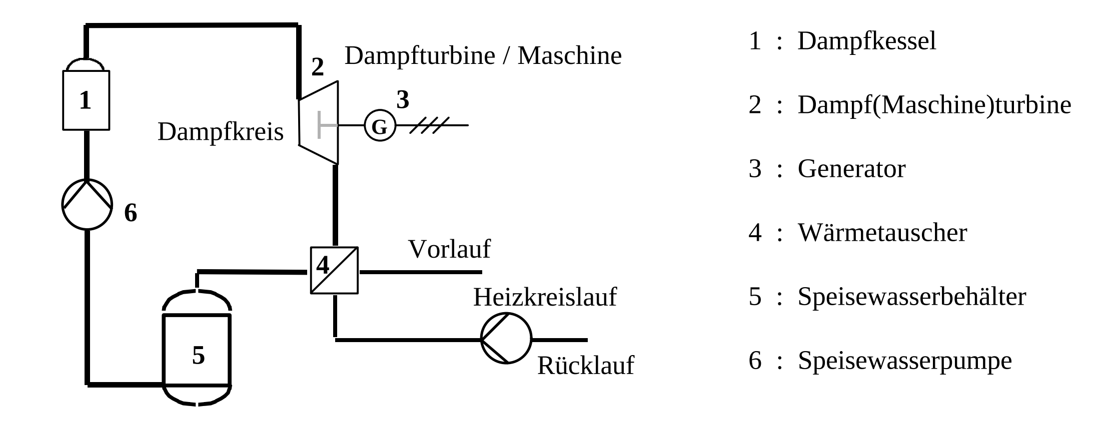


Abb. 3.7 Prinzipschema Dampfkraft-KWK-Anlage

Für Dampfmotoren gelten die gleichen thermodynamischen Grundlagen wie für Dampfturbinen. Allerdings liegt der übliche Leistungsbereich bei Motoren zwischen 40 kW und 2500 kW und damit niedriger als bei Turbinen [3.5]. Dampfturbinen haben historisch die Dampfmaschinen im Zuge der Entwicklung hin zu immer höheren Leistungen abgelöst, da die Kolbenmaschinen aufgund ihrer Schwerfälligkeit hierbei nicht Schritt halten konnten.

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung sind hier im wesentlichen zwei Betriebsarten zu unterscheiden, dies sind der Gegendruckbetrieb und der Kondensationsbetrieb.

Beim Gegendruckprinzip wird die Wärme auf Nutztemperaturnieveau zum Beispiel durch Einspeisen des Abdampfes in ein Fernwärmenetz ausgekoppelt. Diese Betriebsart geht leicht zu Lasten des elektrischen Wirkungsgrades.

Beim Kondensationsbetrieb wird das Temperaturgefälle des Dampfes soweit wie möglich zur Stromerzeugung ausgenutzt. Die im Abdampf verbleibende Abwärme wird im Kondensator an Luft oder Wasser abgeführt und zu Heizzwecken genutzt. Hierbei ist die Anpassung an wechselnden Strom/Wärmebedarf wesentlich besser möglich.

Es können Brennstoffnutzungsgrade für die Kraft-Wärme-Kopplung mit Dampfkraftanlagen erreicht werden, die bis zu 90% betragen.

- **Gasmotor, Beispiel Stirling-Motor**

Die Grundform des Stirlingmotors wurde bereits 1816 von dem schottischen Pfarrer Robert Stirling erfunden. Eine mögliche Bauart dieser Maschine besteht im Prinzip aus einem Zylinder, der auf einer Seite geheizt wird und auf der anderen Seite gekühlt wird [3.12].

Innerhalb des Zylinders laufen dann mit 90° Phasenverschiebung ein Verdränger-Kolben und ein Arbeitskolben. Dadurch wird das Arbeitsmittel hin und her transportiert, wobei es alternierend erwärmt und gekühlt wird [3.13]. Dieser Motor ist hier aufgeführt, weil er prinzipiell eine Alternativmöglichkeit zum Einsatz einer Dampfmaschine darstellt, da er ebenso wie die Dampfmaschine einen Kolbenmotor mit externer Verbrennung darstellt. Im Gegensatz zur Dampfmaschine hat dieser Motor jedoch nie eine größere Verbreitung erfahren. Die Gründe dafür sind sicher vielschichtig, insbesondere zeichnet sich das Prinzip der Dampfmaschine durch eine einfachere Bauweise aus. Der reale Wirkungsgrad des Stirlingmotors liegt näher am Carnot'schen als es bei der Dampfmaschine der Fall ist, da der ideale Wirkungsgrad des Stirlingprozesses dem Carnot'schen entspricht [3.12].

Ebenso wie bei der Dampfmaschine ist der Wirkungsgrad dieser Maschine über einen großen Lastbereich nahezu unabhängig von der Leistungsabgabe.

Die Möglichkeit, Biomasse als Brennstoff einzusetzen hat jedoch zu neuen Entwicklungen von Stirling-Motoren geführt, welche auch schon in Heizkraftwerken eingesetzt werden sollen [3.14].

Der Stirlingmotor hat bereits Eingang gefunden in der Solartechnik in den sogenannten Dish/Stirling-Systemen. Dort wird die direkte Sonneneinstrahlung fokussiert, um über Wärmetauscher hohe Temperaturen für das Arbeitsgas zu erzielen [3.15]. In diesen Motoren findet Helium oder Wasserstoff als Arbeitsgas Verwendung, bei Temperaturen von 600 bis 800°C. Für eine tiefergehende Beschreibung des Stirlingmotors und seiner Möglichkeiten sei hier auf Spezialliteratur verwiesen.

Betrachtet man die hier aufgeführten KWK-Aggregate unter dem Gesichtspunkt des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe, so ergeben sich etliche mögliche Vor- und Nachteil-Aufstellungen. Der Versuch einer *umfassenden* vergleichenden Bewertung in dieser Hinsicht kann hier nicht vorgenommen werden.

Betrachtet man die obige Zusammenstellung jedoch unter dem Gesichtspunkt eines dezentralen Einsatzes in einem privaten Haushalt, so können Turbinensysteme ausgenommen werden. Dieselmotoren, Ottomotoren und Brennstoffzellen benötigen für den Betrieb mit nachwachsenden Rohstoffen eine vorherige Brennstoffaufbereitung und ein ausgebautes Distributionssystem, um die Verfügbarkeit der damit erzeugten Brennstoffe für diesen Einsatz zu gewährleisten. Diese vorbereitenden Maßnahmen sind mit einem Energieaufwand verbunden, der die Effektivität der Primärenergienutzung mindert.

Diese Nachteile lassen sich durch die Verwendung der externen Verbrennungen zum Betrieb eines Stirlingmotors oder einer Dampfmaschine mindern. Es besteht hier die Möglichkeit, einen Brenner zu verwenden, der auf die im näheren Umfeld erhältlichen Biobrennstoffe zugeschnitten ist. Dies erübrigt eine grundlegende Rohstoffaufbereitung, schafft individuelle Freiheit und reduziert den Transportaufwand.

Zusätzliche Überlegungen hinsichtlich weiterer wichtiger Eigenschaften, wie zum Beispiel Langlebigkeit, einfache Konstruktion, geringe Störanfälligkeit, erforderlicher Wirkunggrad und Regelbarkeit von Strom und Wärme haben zu der Entscheidung beigetragen, ein PV-Hybridsystem mit *Dampfmaschine* zur Versorgung privater Haushalte in Betracht zu ziehen.

3.5 Einsatzvoraussetzungen für KWK

Vor der Entscheidung, eine KWK-Anlage einzusetzen und dessen Auswahl sowie Auslegung, muß im allgemeinen eine komplexe Systemanalyse der zu versorgenden Verbrauchers vorgenommen werden [3.5]. Hierfür existieren etliche Fachvorschriften und Richtlinien, wobei insbesondere die VDI-Richtlinie 2067 zu nennen ist.

Zunächst einmal sind die Bedarfswerte sowohl für Strom als auch für Wärme zu erfassen wie

- Leistungen
- Bedarfsgrößen (z.B. Jahresarbeit)
- Tages-, Wochen-, Monats-, Jahresganglinien
- Nutzerparameter (Temperatur, Druck, elektrische Leistungsgrößen u.ä.)

Die Messungen sind über repräsentative Zeiträume durchzuführen um daraus typische Ganglinien zu ermitteln. Einen entscheidenden Einfluß hat auch die Frage, ob ein Netz-Parallelbetrieb oder Inselbetrieb realisiert werden soll.
Aus den aufgenommenen Ganglinien sind die Gleichzeitigkeiten von Strom- und Wärme-Bezug herauszuarbeiten.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist der verfügbare Brennstoff. Im Fall externer Verbrennung betrifft dies die Auswahl und Auslegung des Brenners.

Für Aufstellung und den Betrieb einer KWK-Anlage müssen selbstverständlich die energierechtlichen und umweltrelevanten Gesetze und Vorschriften eingehalten werden.

Außerdem gelten grundsätzlich die Regeln der Heizungstechnik, die entsprechenden DIN-Normen, VDI-Richtlinien, die Dampfkessel-Verordnung, die Technischen Regeln für Dampfkessel (TRD). Die VDI 2035, die DIN 4751(Blatt 1-4) und DIN 4752 sind besonders zu beachten [3.5].

4. Photovoltaische Hybridsysteme

Es werden sowohl die Gründe für den Einsatz photovoltaischer Hybridsysteme, als auch deren verschiedene Realisierungsmöglichkeiten aufgezeigt, um das Umfeld darzustellen, in dem das untersuchte Hybridsystem bestehend aus PV-Anlage und Dampfmaschine mit Kraft-Wärme-Kopplung eingebettet werden kann.

4.1 Back-Up-Systeme

Netzunabhängige Photovoltaikanlagen bestehen in der Regel aus einem Solargenerator, der mit einem Energiespeicher gekoppelt ist, um eine Vergleichmäßigung der Energieverfügbarkeit zu erreichen. Um eine Stromversorgung unabhängiger vom stochastischen Verhalten des Strahlungsangebots zu ermöglichen und die Größe der PV-Anlage, sowie die Speicherkapazität in Grenzen zu halten, ist es vorteilhafter, die Photovoltaikanlage durch ein zusätzliches Aggregat zur Stromerzeugung, ein sogenanntes Back-Up-System [4.1] zur Unterstützung zu ergänzen. Diese Kombination einer PV-Anlage mit einem Back-Up-System zu einer aufeinander abgestimmten Gesamtanlage bezeichnet man dann als Hybridsystem [4.2].

Back-Up-Systeme können zum Beispiel sowohl Diesel- oder Flüssiggasmotoren als auch Wind- oder Wasserkraftanlagen oder auch Kombinationen davon sein.

Für das sinnvolle Zusammenspiel dieser Teilsysteme sind diese Hybridsysteme mit einer übergeordneten Steuerung auszustatten. Diese sollte zum einen die gewünschte Stromversorgung effizient ermöglichen und zum anderen außer der PV-Anlage auch den eventuell zusätzlich genutzten Energieträgern Wind oder/und Wasser Priorität einräumen, insbesondere, wenn ein Back-Up-System mit *kohlenstoffhaltigen* Brennstoffen betrieben wird. Dadurch wird nicht nur ein möglichst rationeller Einsatz der Brennstoffe erzielt, sondern auch die CO_2-Emmisionen minimiert. Der Einsatz fossiler Brennstoff sollte nach Möglichkeit ganz vermieden werden.

Insbesondere bei dem Einsatz von Back-Up-Systemen mit thermischen Prozessen empfiehlt sich die Einbindung des Kraft-Wärme-Kopplungs-Prinzips, falls Wärmeverbraucher vorhanden sind.

4.2 Aktuelle Systeme

Das derzeit größte Marktpotential für derartige Hybridsysteme liegt in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Bei der Weltjahresproduktion von Photovoltaikmodulen nimmt dieser Markt seit einigen Jahren einen Anteil von mehr als 85% ein. In Deutschland hingegen spielen Inselsysteme im größeren Leistungsbereich bisher eine untergeordnete Rolle, da aufgrund der weitgehenden Netzerschließung netzferne Verbraucher, wie zum Beispiel Berghütten, vereinzelte Ausnahmen darstellen [4.3].

Dabei findet man sowohl Hybridsysteme, deren Dieselaggregat nur eine Photovoltaikanlage unterstützt, als auch Systeme mit zusätzliche Ergänzung durch eine Windkraftanlage. Mit einer Windkraftanlage bietet sich eine sinnvolle Möglichkeit, die Verfügbarkeit des Inselsystems zu erhöhen, da das Angebot von Windenergie und die solare Energieeinstrahlung sich häufig komplementär zueinander verhalten. Außerdem erhöht sich damit der Gesamtanteil an regenerativer Stromerzeugung [4.2].

4.3 Regenerative Hybridsysteme

Vor dem Hintergrund der Klima- und Ressourcen-Problematik stellt sich nun die Frage, welche Möglichkeiten es gibt, photovoltaische Hybridsysteme aufzubauen, die sowohl ausreichende Verfügbarkeit versprechen, als auch mit *rein regenerativen Primärenergieträgern* auskommen.

Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit stellen zu können, seien hier einige der prinzipiell denkbaren Komponenten eines Hybridsystems aufgezeigt.

Unter Berücksichtigung möglicher Wärmeverbraucher wird das folgende gemeinsame Aufbauprinzip für ein PV-Hybridsystem zugrundegelegt:

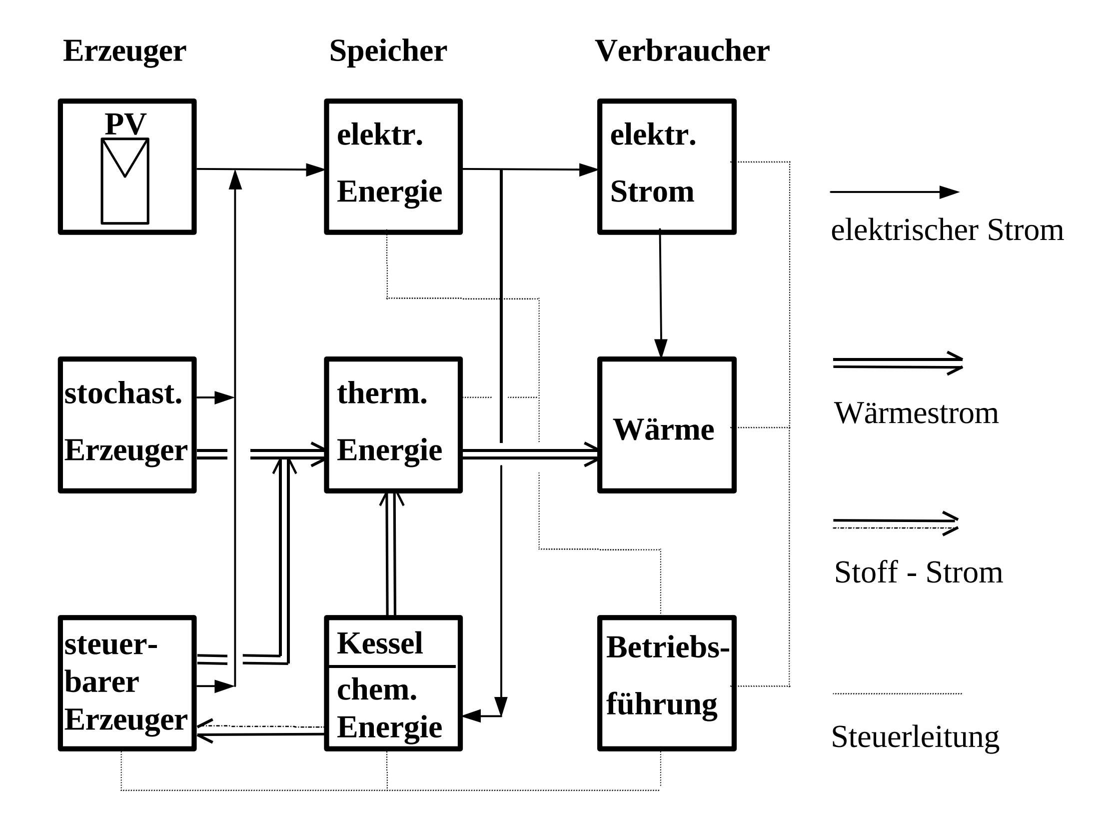


Abb. 4.1 Aufbauprinzip photovoltaischer Hybridsysteme

Bei den Zusatzerzeugern wird hier zwischen *stochastischen* und *steuerbaren* unterschieden. Ein stochastischer Erzeuger sei hier definiert als ein Erzeuger, der auf eine Energiequelle angewiesen ist, dessen momentane Verfügbarkeit weitestgehend durch den Zufall bestimmt wird. Diese Zufallsabhängigkeit ist eine Folge der meteorologischen Gegebenheiten, die lokal den Gesetzmäßigkeiten der Chaos-Theorie gehorchen.

Im Gegensatz dazu ist ein steuerbarer Erzeuger bei ausreichender Versorgung mit Primärenergie in Bezug auf seine Verfügbarkeit determinierbar. In diesem Fall hat der Mensch die Möglichkeit, über eine Steuerung die Verfügbarkeit selbst festzulegen.

Innerhalb jeder Gruppe können auch mehrere verschiedene Erzeuger kombiniert werden. Dabei ist hier die Einbeziehung dieser Zusatzerzeuger-Gruppen jeweils als Option zu verstehen, d.h. entweder stochastisch oder steuerbar oder beides. Unter einem stochastischen Erzeuger sei hier eine von natürlichen Prozessen abhängige Energiewandlung gemeint.

Zu den *stochastischen Erzeugern* zählen abgesehen vom Basiselement Photovoltaik folgende Erzeuger:

- *Windkraftanlage*
- *Kleinst-Wasserkraftanlage*
- *Solarkollektoren (nur Wärme).*

Solarkollektoren können zur teilweisen Deckung des Wärmebedarfs eingesetzt werden, stehen aber in der Regel in Flächenkonkurrenz zur Photovoltaik, falls die verfügbare Fläche begrenzt ist. Ausnahmen bilden sogenannte *Hybridkollektoren* [4.4], die sowohl photovoltaisch als auch wärmeliefernd arbeiten können. Entwicklungen dazu sind jedoch noch nicht ausgereift.

Für die steuerbaren Erzeuger bildet in der Regel auch Sonnenenergie in gespeicherter Form die Versorgungsgrundlage.

Steuerbare Erzeuger seien zum Beispiel:

- *Brennstoffzelle (H_2, Reforming von Biogas, u.ä)*
- *Pflanzenöl-Motoren*
- *Biogas-Motoren*
- *Stirling-Motor (externe Verbrennung von Biomasse)*
- *Dampfmaschine (externe Verbrennung von Biomasse)*
- *Thermoelektrische Wandler (Biobrennstoffe)*
- *Geothermie-Wandler.*

Diese Erzeuger sind prinzipiell auch für Kraft-Wärme-Kopplung einsetzbar [4.5].

Die freie Verfügbarkeit über die Mehrzahl dieser Erzeuger kann aber nur gewährleistet werden, wenn ein ausreichend großes Brennstofflager besteht und/oder eine schnelle, dem Verbrauch angepaßte Nachlieferung erfolgt. Dies gilt insbesondere, wenn der Brennstoff mit Hilfe der Überschüsse an stochastisch erzeugter elektrischer Energie erzeugt wird, um somit als chemische Energie gespeichert zu werden.

Ein Beispiel dafür ist ein Elektrolyseur zur Erzeugung von Wasserstoff. Dieser Brennstoff könnte dann wiederum in steuerbaren Erzeugern wie zum Beispiel einer Brennstoffzelle oder einem Gasmotor mit KWK, sowie auch einem Heizkessel zugeführt werden.

Ist der Wärmebedarf anteilmäßig nicht sehr hoch, so kann hierfür natürlich auch elektrischer Strom eingesetzt werden, wenn die stochastische Erzeugung für den Gesamtenergiebedarf ausreichend dimensioniert ist. Hier ist sicherlich auch der Einsatz von Wärmepumpen sinnvoll [4.6].

Eine nicht unwesentliche Rolle in diesen Hybridsystemen spielt die Energiespeicherung, da aufgrund der Vergleichmäßigung in der Energieverfügbarkeit hierdurch die steuerbaren Erzeuger entlastet werden. Dies betrifft sowohl die elektrischen, thermischen als auch die chemischen Energiespeicher.

Es ist dabei grundsätzlich noch zu unterscheiden zwischen Speichern, die innerhalb des Systems wiederbefüllbar sind, und Speichern die nur durch einen Eingriff von außen befüllt werden können. Letztere sind vornehmlich Speicher für chemische Energie in Form von Brennstoff für die steuerbaren Zusatzerzeuger.

Ausnahmen bilden chemische Brennstoffe, die innerhalb des Systems durch elektrische Energiewandlung, sinnvollerweise mit stochastischem Erzeuger, gebildet werden können.

Betrachtet man die Energiespeicher, so ergibt sich nach dem obigen Muster die folgende, sicher nicht vollständige, Aufstellung möglicher Speicherelemente:

a) Durch das System wiederaufladbare Speicher:

i) *elektrische Energie*

- Massenspeicher (Kurzzeit)
- Kondensator (Kurzzeit)
- Akkumulatoren
- Wasserstoff-Brennstoffzelle mit H_2 - Speicher

ii) *thermische Energie*

- sensible Wärme (i.a. Wasser)
- latente Wärme (Paraffine u.ä.)

iii) *chemische Energie*

- Wasserstoff (über Elektrolyse)

b) Durch externen Eingriff wiederaufladbare Speicher:

- feste Brennstoffe (Holz, Biomasse-Pellets u.ä.)
- flüssige Brennstoffe (Pflanzenöle, Alkohole u.ä.)
- gasförmige Brennstoffe (H_2 ,Biogas, Klärgas, u.ä)

Je nach Lastdynamik können auch Kombinationen von Speichern eingesetzt werden; so zum Beispiel Massenspeicher [4.7] für kurzzeitige Spitzenanforderungen mit einem Akkumulator für die Grundlast.

Besteht die Möglichkeit einer zusätzlichen Netzanbindung, so kann zumindest auf den Speicher für elektrische Energie verzichtet werden. Die Möglichkeit, ins Netz einzuspeisen setzt allerdings voraus, daß eine ausreichende Netzkapazität zur Verfügung steht [4.8]. Mit dieser Problematik wird man sich mit fortschreitendem Einsatz dezentraler regenerativer Anlagen in zunehmendem Maße beschäftigen müssen. Damit verknüpft sind die Netz- und Kraftwerksregelstrategien, worauf im Abschnitt 4.4 etwas ausführlicher eingegangen wird.

Nicht minder wichtig als die bisher aufgeführten Komponenten ist die *Betriebssteuerung*. Von ihr hängt wesentlich das effektive Zusammenspiel aller Systembestandteile ab. Da die Energiespeicher die Nahtstelle zwischen Erzeuger und Verbraucher darstellen, ist das Energiespeichermanagement eine Schlüsselfunktion der Betriebsführung. So hängt die Lebensdauer von Akkumulatoren sehr stark von einer gut abgestimmten Laderegelung ab [4.9].
Die Betriebssteuerung beinhaltet ebenfalls die Erfassung und Anzeige der Betriebszustände und der Energieflußbilanzen sowie die Funktionsüberwachung mit Fehlermeldungen. Ebenso wichtig ist die Bereitstellung von Eingriffsmöglichkeiten für den Betreiber um im Fehlerfall Einfluß nehmen zu können, oder zu Testzwecken.

Eine weitere mögliche Aufgabe der Betriebssteuerung kann ein sogenanntes *Lastmanagement* sein. Dies besteht zum Beispiel darin, mit Hilfe einer Prioritätenliste den gleichzeitigen Betrieb von leistungsstarken Geräten zu vermeiden, wenn dies vertretbar ist wie etwa bei Elektroherd und Waschmaschine.

Durch diese Maßnahme kann die für das Hybridsystem anzusetzende maximale Leistung begrenzt werden [4.3].

4.4 Hybridsystem-Modelle

Prinzipiell denkbare photovoltaische Hybridsystem-Modelle allgemeinster Art ergeben sich aus der sinnvollen kombinatorischen Verästelung der folgenden Systemeigenschaften und möglichen Bestandteile, wie beispielhaft vorgeführt:

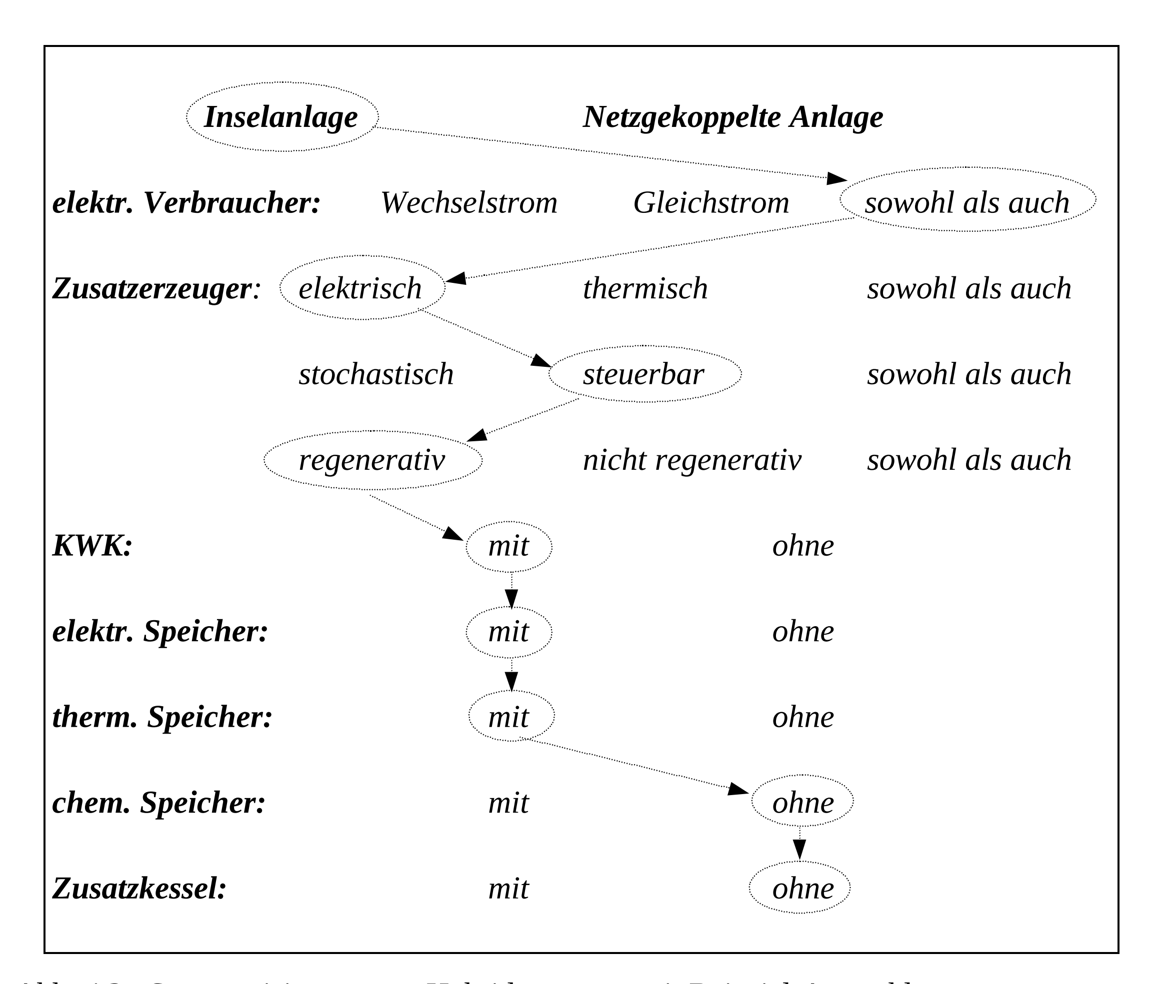


Abb. 4.2 Systematisierung von Hybridsystemen mit Beispiel-Auswahl

Im Gegensatz zum elektrischen Zusatzerzeuger, der im allgemeinen sowohl Kraft als auch Wärme liefert, soll hier der mit "thermisch" gekennzeichnete ausschließlich Wärmeenergie erzeugen.
Wenn man den Fall "stochastische nicht regenerative" Erzeugung ausschließt, ergeben sich nach diesem Muster rechnerisch 4032 grundsätzliche Realisierungsmöglichkeiten für ein Hybridsystem. Dies läßt ahnen, welch enormes Entwicklungs- und Einsatzpotential solche Hybridsysteme bieten.
Natürlich sind aufgrund der Komponenten-Auswahlmöglichkeiten weitergehende Differenzierungen möglich, so daß für praktische Aufbauten eine weitaus größere Vielfalt denkbar ist.

Auch könnten zum Beispiel bei einer Gleichstromversorgung unterschiedliche Spannungsniveaus berücksichtigt werden [4.8]. Für das ausgewählte Modell läßt sich zum Beispiel das folgende stark vereinfachte Aufbauschema aufstellen:

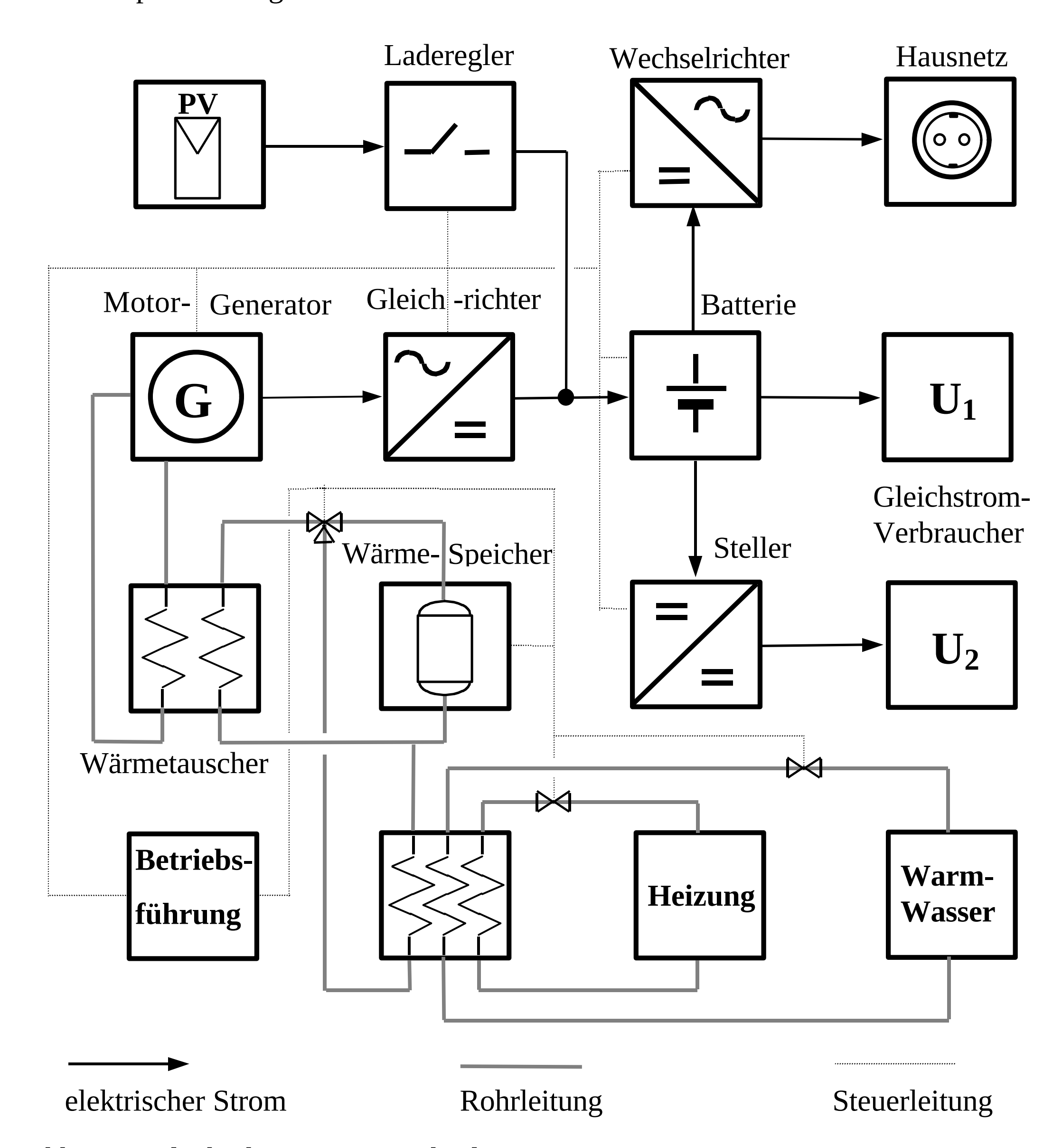


Abb. 4.3 Blockschema eines Hybridsystems mit KWK

Diese Zusammenstellungen verdeutlichen, daß hier eine Vielzahl komplexer Systeme entwickelt werden können, wobei abgesehen vom jeweiligen Gesamtsystem selbst die einzelnen Komponenten noch einigen Forschungs- und Entwicklungsaufwand erfordern, um in der Zukunft über ausgereifte und optimierte PV-Hybridsysteme verfügen zu können.

Außer den bisher betrachteten dezentralen Hybridanlagen kleinerer Leistung für den häuslichen Bedarf gibt es natürlich auch die Möglichkeit, große, zentrale Photovoltaik-Kraftwerke bis hin zum MW-Bereich zu erstellen, und diese mit Windkraftgeneratoren und weiteren Zusatzgeneratoren zu einem größeren Verbundsystem zu verknüpfen.

Dadurch sind Versorgungen mit "Inselnetzen" unterschiedlichster Leistungsklasse denkbar, die wiederum gekoppelt werden können, um sie, falls vorhanden, an ein allgemeines Verbundnetz anzuschließen. Bezüglich der reinen Stromversorgung läßt sich auf diese Weise ein Modell eines modularen funktionsgegliederten Systemaufbaus aufstellen. Dies ist dann eine modulare Hybridtechnik zur Stromversorgung, welches ein nach Funktionen geordnetes Baukastenprinzip darstellt [4.10]. Ziel dieser Modellbildungen ist es, eine flächendeckende regenerative Hybridtechnik aufzubauen, welche sowohl dezentral die Versorgungsanforderungen erfüllt, als auch übergeordnet einen Netzverbund zum Ausgleich ermöglicht. Dies setzt natürlich eine wesentlich differenziertere Art der Koordination und Regelstrategie voraus, als es die bisherige Netzführung bietet. Voraussetzung für eine derartige erfolgreiche Vernetzung sind natürlich auch festzulegende Standardisierungen für die Gewährleistung der Kompatibilitäten.

Im Hinblick auf den wachstumsbedingt erforderlichen sparsamen Umgang mit den Biobrennstoffen für Verbrennungsmotoren, sollte man dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung im Hinblick auf solche Konzepte eine gebührende Aufmerksamkeit schenken. Mit einem Stromüberschuß erzeugter Wasserstoff kann hier zusätzlich die Versorgung mit Brennstoffen unterstützen. Dafür ist im Vergleich zum Einsatz von Biomasse eine andere Logistik und Systemtechnik erforderlich.

Auch die Einbindung von solarthermischen Kraftwerken in Gebieten mit ausreichender Direkteinstrahlung in diese Strukturen ist denkbar [4.11].

4.5 Einsatzbereiche für Hybridsysteme

Der Einsatz von Hybridsystemen kann aus unterschiedlichen Überlegungen heraus vorgenommen und motiviert werden. So kann man zum Beispiel die Photovoltaikanlage als Ergänzung zu einem Diesel-Aggregat betrachten, um damit den Verbrauch an fossilem Brennstoff zu reduzieren. Solche Inselanlagen zur Stromversorgung lassen sich auch in Container-Bauweise als mobile Systeme konzipieren [4.12] und sind somit besonders geeignet für Entwicklungshilfeprojekte.

Heute haben in etwa zwei Milliarden Menschen, ein Drittel der Erdbevölkerung, keinen Anschluß an eine elektrische Energieversorgung. Hier besteht die Möglichkeit, ohne die hiesigen Umstrukturierungsschwierigkeiten von vornherein ein weitestgehend regeneratives Versorgungssystem aufzubauen [4.10].

Während dieser Aufbauphase wird man im Zuge des wirtschaftlichen Wachstums der betroffenen Länder in absehbarer Zeit wahrscheinlich noch nicht ganz auf fossile Energieträger verzichten können. Aus diesem Grund sollte ein der Aufbau von Versorgungen mit regenerativer Energie so rasch wie möglich vorangetrieben werden.

Bei dem Aufbau von Hybridsystemen in diesen Schwellen- und Entwicklungsländern kann nicht nur wertvolle Erfahrung gewonnen werden, sondern auch aufgrund des dortigen Marktpotentials und des damit verbundenen Absatzes die Wirtschaftlichkeit erhöht werden.

Diese Effekte können die derzeitigen Probleme bei der Umstrukturierung unseres eigenen Versorgungssystems aufgrund des herrschenden Verdrängungswettbewerbs erheblich mindern.

Bei der Konzipierung von Hybridsystemen müssen sowohl die klimatisch-meteorologischen Bedingungen, als auch die lokale Verfügbarkeit von Primärenergie berücksichtigt werden. Es ist sicherlich von Bedeutung, ob der Einsatzort in der Äquatorzone oder etwa im nördlichen Sibirien liegt. Dies betrifft insbesondere die Überlegungen zur Integration einer Kraft-Wärme-Kopplung.

So ist in äquatorialen Gegenden die PV-Anlage eher durch Windkraft als durch Zusatzerzeuger mit KWK zu unterstützen, denn der Wärmebedarf kann sicher durch Kollektor-Anlagen gedeckt werden. Hier bietet sich auch der Einsatz solarer Wasserstoff-Technik an. Im Gegensatz dazu ist in den kälteren Regionen der Erde eher der Einsatz von KWK-Anlagen vorzusehen.

Das in dieser Arbeit vorgestellte photovoltaische Hybridsystem mit einer Dampfmaschine zur Kraft-Wärme-Kopplung ist vornehmlich geeignet für Energieverbraucher, deren Strom- zu Wärme-Energieverbrauch-Verhältnis einen Wert von etwa ein Zehntel oder kleiner aufweist.

Ausgehend von der Vorstellung, daß unsere zukünftige Energieversorgung einen minimierten Brennstoffeinsatz anstrebt, und dies mit nachwachsenden Rohstoffen, so wäre ein derartiges System auch für die Versorgung privater Haushalte denkbar. Für ein derartiges dezentrales System spricht sowohl die Effektivität bei ortsnaher Kraft-Wärme-Kopplung als auch die Energiebilanz bei der Verwendung und Versorgung mit vorzugsweise fester Biomasse. Feststoff-Biomasse hat in der Regel einen vergleichsweise geringeren Aufbereitungs-Energiebedarf als andere Formen [4.13].

Dieses Hybridsystem-Konzept kann dann nicht nur für netzferne Wohnbereiche angewandt werden, sondern auch für netzverbundene Haushalte, im Sinne einer modularen komplexen Hybridsystem-Vernetzung.

Aufgrund der bereits erwähnten Konkurrenzsituation zum bestehenden Netzverbund, ist der Einsatz in netzfernen Bereichen zunächst jedoch wahrscheinlicher. Deshalb wurde das beschriebene PV-Dampfmaschinen-Hybridsystem für eine autarke Versorgung konzipiert, zumal diese Variante sicherlich einen höheren Anspruch an die Betriebsführung stellt.

5. Energieverbrauch eines Privathaushalts

Wie bereits dargestellt, erfordert die Installation einer Kraft-Wärme-Kopplung die Erfassung der Verbrauchsdaten und deren zeitliche Veränderlichkeit. Das hier untersuchte Hybridsystem stellt im Prinzip eine spezielle komplexe KWK mit unterschiedlicher Betriebsführung bei Sommer- und Winter-Verhältnissen dar. Für dessen Auslegung müssen deshalb die Haushaltsverbräuche mit den entsprechenden Lastganglinien erfaßt werden und mit dem verfügbaren Energieangebot der Photovoltaikanlage korreliert werden.

Hier werden zunächst die Energieverbräuche eines durchschnittlichen privaten deutschen Haushalts dargestellt, wobei hierfür in der Literatur verfügbare Daten durch eigene Messungen ergänzt wurden.

Die dynamischen Lastkurven werden im Sinne einer besseren Verknüpfung approximativ durch mathematische Formeln zugänglich gemacht. Dies ist insbesondere für Simulationen ein wertvolles Hilfsmittel.

5.1 Stromverbrauch

In Deutschland teilte sich der Stromverbrauch von 1574 PJ im Jahre 1995 wie folgt auf die einzelnen Verbrauchersektoren auf [5.1]:

Industrie	***Haushalt***	***Kleinverbraucher***	***Verkehr***
43,2%	**29,3%**	**23,9%**	**3,6%**

Tabelle 5.1 Stromverbrauch Deutschland 1995

Der Sektor Haushalt läßt sich weiter nach den Bedarfsarten aufschlüsseln mit dem folgenden Ergebnis:

Prozeßwärme	***Mechanische Energie***	***Raumheiz-wärme***	***Information & Kommunikation***	***Beleuchtung***
32,5%	**28,0%**	**20,4%**	**10,8%**	**8,3%**

Tabelle 5.2 Stromverbrauch eines privaten Haushalts

Man erkennt, daß hier rund ein fünftel des Stromverbrauchs der Haushalte auch für Raumheizung aufgewandt wird. Ebenso fällt ein recht großer Anteil auf die Erzeugung von Prozeßwärme.

Für den durchschnittlichen deutschen Privathaushalt mit 2,2 Personen und 80 m² Wohnfläche läßt sich ein Jahresstromverbrauch von rund **3000 kWh/a** (Rechengröße 3146 kWh/a) feststellen, wobei etwa zwei Drittel davon, also 2000 kWh als Grundbedarf angesehen werden [5.2].

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Energieverbräuche einzelner Verbraucher, wie sie von einer Durchschnittsfamilie verursacht werden [5.3]:

Gerät	Energieverbrauch / Jahr (kWh/a)
Herd / Backofen	450
Gefrierschrank	450
Kühlschrank 220 Liter	450
Brenner, Pumpen (Einfamilienhaus)	400
Geschirrspüler	400
Beleuchtung	350
Trockner	300
Waschmaschine	300
TV / Video / Radio	250

Tabelle 5.3 Stromverbrauch einiger Haushaltsgeräte

Der Stromverbrauch und Lastverlauf der Haushalte hängt von verschiedenen Faktoren ab. Da ist vor allem der meteorologische Einfluß, aber auch die Hell- Dunkel-Stunden, der Wochentag, Feiertage und Urlaubsreisen sind von Bedeutung. Auch können die Tagesverläufe durch zufällige, einmalige Ereignisse, wie Kälteeinbruch, Verfinsterung oder zum Beispiel Fernsehsendungen atypisch verändert werden [5.4].

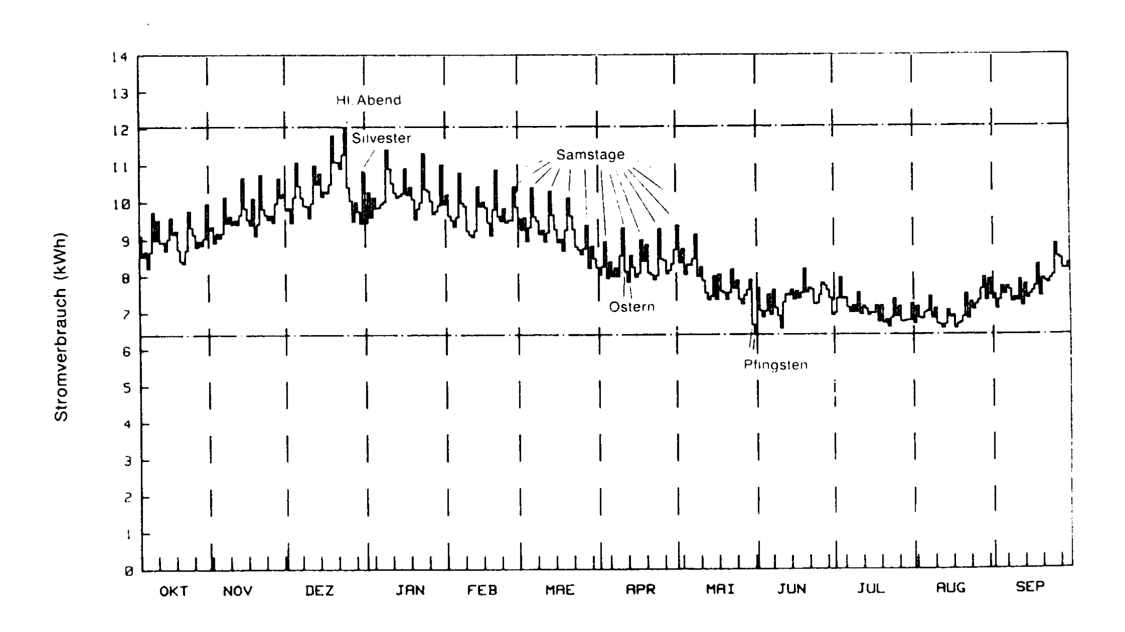


Abb. 5.1 Täglicher Stromverbrauch eines Durchschnittshaushaltes [5.2]

Der saisonale Stromverbrauch zeigt höhere Verbrauchswerte in der kalten Jahreszeit als im Sommer. Dieser jahreszeitlichen Schwankung wird noch ein Wochentag-Einfluß überlagert. Hierbei zeigen sich wiederkehrend höhere Werte an den Samstagen, wobei dieser Mehrverbrauch ebenfalls im Winter stärker ausgeprägt ist.

Diese Jahresganglinie für den durchschnittlichen Haushalt kann im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit mit hinreichender Genauigkeit durch eine Ausgleichskurve charakterisiert werden in der Form:

$$\overline{P}_{d,Strom} = \left\{ 8{,}6 + 1{,}6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d \right) \right\} \quad \left[\frac{kWh}{d} \right] \quad \text{mit} \quad d \equiv Tag \tag{5.1}$$

Ausgleichskurve der Jahresganglinie für den durchschnittlichen Haushalt

Vergleichende eigene Messungen zugrundelegend, läßt sich mit Hilfe dieser "*Master-Kurve*" ein vom Durchschnitt abweichender Haushalt ebenfalls recht gut approximieren. Dies ist durch eine einfache Skalierung möglich:

$$P_{d,Strom} = z \cdot \overline{P}_{d,Strom} \qquad \text{mit} \qquad z = \frac{Jahresverbrauch \quad Haushalt}{3146 \quad kWh/a} \tag{5.2}$$

Ausgleichskurve der Jahresganglinie für einen allgemeinen Haushalt

Der Skalierungsfaktor für einen ausgewählten Haushalt ergibt sich aus dem Verhältnis des Gesamtenergieverbrauchs eines Jahres zum Durchschnittswert.

Eigene Messungen an einem freistehenden Einfamilienhaus mit einer sechsköpfigen Familie in Iserlohn ergaben beispielsweise einen Skalierungsfaktor von etwa 1,75 entsprechend eines Jahresbedarfs von ungefähr 5500 kWh.

Der monatliche Verbrauch kann aus der Jahresganglinie mit Hilfe einer Integration über das entsprechende Tagesintervall berechnet werden.

Eine weitere Differenzierung der Stromverbrauchsanalyse ergibt sich aus dem wöchentlichen Verlauf. Dabei zeigt sich nur ein geringer Unterschied von Montag bis Freitag. Am Wochenende, insbesondere am Samstag, sind die Verbrauchswerte aufgrund der ganztägigen Anwesenheit der Hausbewohner etwas höher. Die Schwankungen innerhalb der Woche sind jedoch nicht gravierend. So beträgt die maximale Abweichung vom Mittelwert im Sommer 5,7% und im Winter 8,7%.

Für durchschnittliche Haushalte beträgt der Mittelwert für den täglichen Stromverbrauch einer typischen ***Sommerwoche 7,439 kWh*** und für eine typische ***Winterwoche 10,123 kWh***. Die Werte für allgemeine Haushalte können auch hier durch Multiplikation mit dem Skalierungsfaktor z erhalten werden.

Die folgenden tabellarischen Aufstellungen schlüsseln den Stromverbrauch einer Woche auf. Dabei wurde ein repräsentativer Wochenverlauf sowohl für den Sommer als auch für den Winter herausgearbeitet.

Die ermittelten Werte wurden auf der Grundlage einer 15-Minuten-Mittelung für einen durchschnittlichen deutschen Haushalt festgestellt [5.2].

Wochentag	Max-kW	Max-Wert Uhrzeit	Verbrauch kWh
Mo	0,511	12:15	7,631
Di	0,454	13:00	7,371
Mi	0,464	12:15	7,155
Do	0,489	19:15	7,116
Fr	0,468	19:15	7,415
Sa	0,528	12:00	7,861
So	0,641	12:00	7,527
Woche	0,641	12:00	52,076

Tabelle 5.4 Typischer Wochenverbrauch eines Haushalts im ***Sommer***

Þ ***Mittelwert Sommer: 7,439 kWh/Tag ; Max - Min = 0,75 kWh***

Wochentag	Max-kW	Max-Wert Uhrzeit	Verbrauch kWh
Mo	0,700	19:15	10,354
Di	0,790	19:15	9,993
Mi	0,734	19:15	9,708
Do	0,717	19:30	9,771
Fr	0,791	19:15	9,929
Sa	0,831	19:15	11,000
So	0,850	20:00	10,109
Woche	0,850	20:00	70,864

Tabelle 5.5 Typischer Wochenverbrauch eines Haushalts im ***Winter***

Þ ***Mittelwert Winter: 10,123 kWh/Tag ; Max - Min = 1,3 kWh***

Aufgrund der relativ geringen Schwankungen um diese Mittelwerte im Laufe der Woche wird die alleinige Charakterisierung des Wochenverbrauchs durch den mittleren Wert hier als ausreichend betrachtet. Für allgemeine Haushalte ergeben sich somit für repräsentative Sommer- und Winter-Wochen die folgenden Mittelwerte

$$P_W(Sommer) = z \cdot 7{,}439 \quad kWh/d \tag{5.3}$$

$$P_W(Winter) = z \cdot 10{,}123 \quad kWh/d\,. \tag{5.4}$$

Nachdem der Jahres- und Wochenverlauf ausreichend genau einer quantitativen Beschreibung zugänglich gemacht ist, soll nun der Stromverbrauch während des Tagesablaufs analysiert werden, wie er sich aufgrund des menschlichen Lebensrhythmus ergibt. Daraus wird wiederum versucht, einen repräsentativen Tagesverlauf für einen typischen Sommer- und Wintertag darzustellen.

Sowohl im Sommer als auch im Winter zeichnet sich der Tagesverlauf für den Stromverbrauch durch drei Maxima aus, die je nach Wochentag unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Die Scheitelwerte der Maxima der 15-Minuten-Tageslastkurven liegen sowohl im Sommer als auch im Winter jeweils etwa zwischen 7:00 und 8:00 Uhr , 12:00 und 13:00 Uhr sowie zwischen 19:00 bis 20:00 Uhr. Diese Zeiten korrelieren im wesentlichen mit den täglichen Mahlzeiten. Allerdings liegen die Niveaus im Winter generell höher als im Sommer, und der erhöhte Verbrauch am Abend ist besonders ausgeprägt. Es ist sinnvoll, den Tagesverlauf in zusammenhängende Verbrauchsintervalle aufzuteilen, und den darüber gemittelten Stromverbrauch darzustellen. Dabei ergeben sich sieben Intervalle aus der Abgrenzung der Mahlzeiten und den Zwischenzeiten.

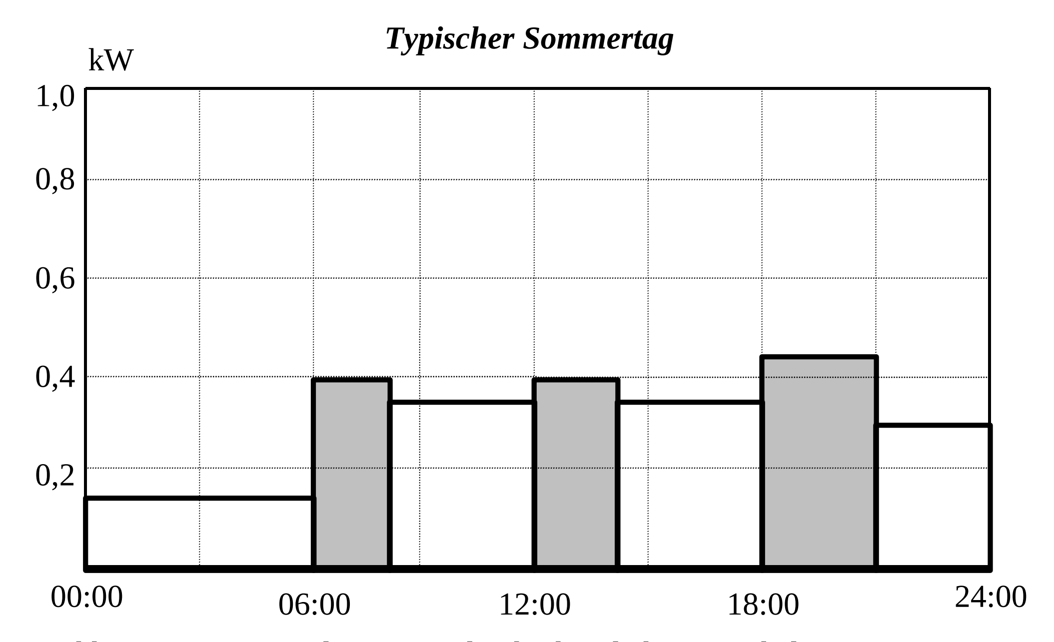


Abb. 5.2 Tagesganglinie eines durchschnittlichen Haushalts im ***Sommer***

Damit ergibt sich eine einfache mathematische Beschreibung durch Zuordnung konstanter Verbrauchsdaten zu den entsprechenden Zeitintervallen. Diese Charakterisierung läßt sich in tabellarischer Form darstellen. Die Umrechnung vom durchschnittlichen Haushalt auf einen beliebigen Haushalt kann hier ebenfalls näherungsweise durch Anwendung des Skalierungsfaktors z erfolgen.

Die folgende Tabelle für einen Sommertag zeigt sowohl die mittlere Leistung als auch die gesamte verbrauchte Energie für jedes Intervall. Die letzte Zeile stellt zusammenfassend eine Mittelung über den gesamten Tag dar.

Uhrzeit	***Leistung kW***	***Energie kWh***
00:00 - 06:00	0,13	0,78
06:00 - 08:00	0,40	0,8
08:00 - 12:00	0,35	1,4
12:00 - 14:00	0,40	0,8
14:00 - 18:00	0,35	1,4
18:00 - 21:00	0,45	1,35
21:00 - 24:00	0,3	0,9
00:00 - 24:00	***0,31***	***7,43***

Tabelle 5.6 Tagesgang eines durchschnittlichen Haushalts im ***Sommer***

Die gleiche Prozedur auf die Winterzeit angewandt ergibt die nachfolgenden Ergebnisse:

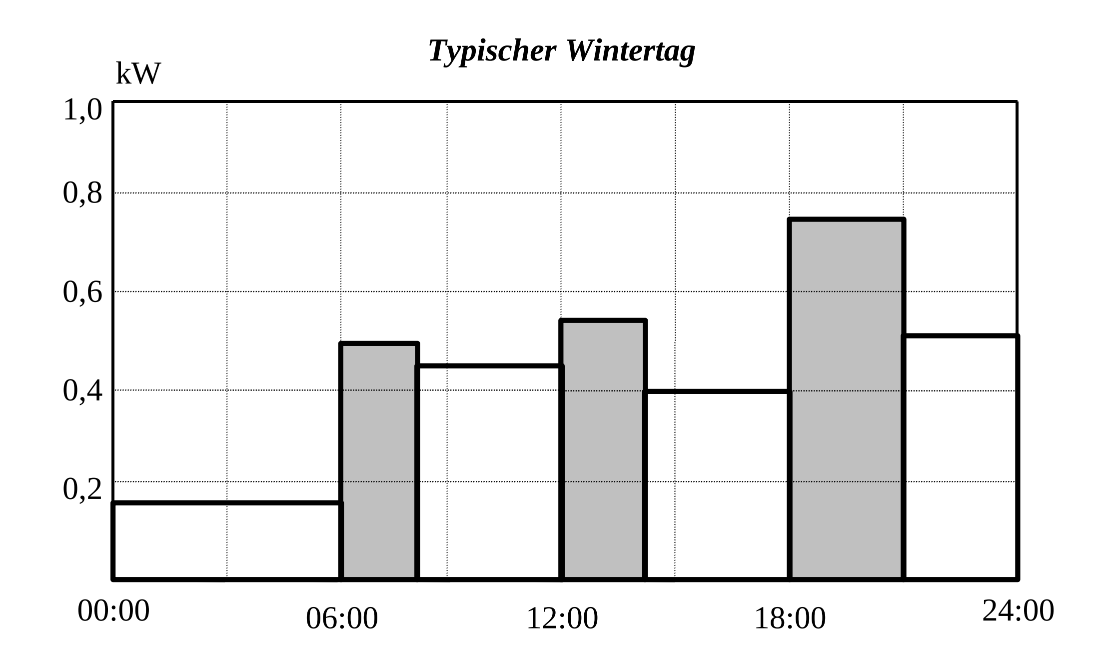


Abb. 5.3 Tagesganglinie eines durchschnittlichen Haushalts im ***Winter***

Für den Winter erhält man dann in der gleichen Form:

Uhrzeit	***Leistung kW***	***Energie kWh***
00:00 - 06:00	0,15	0,90
06:00 - 08:00	0,50	1,00
08:00 - 12:00	0,45	1,80
12:00 - 14:00	0,55	1,10
14:00 - 18:00	0,40	1,60
18:00 - 21:00	0,75	2,25
21:00 - 24:00	0,50	1,50
00:00 - 24:00	***0,423***	***10,15***

Tabelle 5.7 Tagesgang eines durchschnittlichen Haushalts im ***Winter***

Aufgrund der Tatsache, daß sich diese Ergebnisse sich auf gleichzeitige Messungen vieler Haushalte mit einer 15-Minuten-Mittelung stützen [5.2], erscheinen die auftretenden Leistungswerte nicht allzu hoch.

Da jedoch viele Haushaltsgeräte, die nur kurzfristig eingeschaltet werden, erheblich höhere Leistungen in Anspruch nehmen, treten zeitweise Spitzenwerte auf, die weit über diesen gemittelten Werten liegen. Dies betrifft den Elektroherd in besonderer Weise, so daß kurzfristig Spitzen bis 10 kW auftreten können. Wenn diese Spitzen im Stromverbrauch gemessen werden sollen, so ist eine Intervallänge von 5 Minuten oder kleiner zu wählen.

Messungen mit einer 5-Minuten-Auflösung an einem freistehenden Einfamilienhaus mit einer fünfköpfigen Familie in der Eifel ($z \approx 1{,}82$) haben zum Beispiel in einer Dezemberwoche folgende Ergebnisse erbracht:

kW	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10
%	84	10,9	3,28	1,98	0,54	<0,15	<0,05	< 0,05	-	-

Tabelle 5.8 Klassenaufteilung des Leistungsbedarfs eines Haushalts

Das Auftreten dieser Verbrauchsspitzen darf nicht vernachlässigt werden, denn der Ausgleich über diese temporär auftretenden extremen Schwankungen kann im allgemeinen bei einem Hybridsystem nur über die Speicherbatterien oder einen Netzanschluß erfolgen. Ebenso sind die Schwankungen im Verbrauch innerhalb der Woche zu berücksichtigen. Diese Umstände werden noch einmal bei der Dimensionierung des Hybridsystems speziell betrachtet.

In Verbindung mit dem Umrechnungsfaktor z für allgemeine Haushalte, sind die Darstellungen mit Hilfe der Intervall-Mittelung als Auslegungsgrundlage für das Hybridsystem eine gute Basis.

5.2 Wärmeverbrauch

Der Wärmeverbrauch ist im Vergleich zum Stromverbrauch meßtechnisch schwerer zugänglich. Ausnahmen bilden Haushalte, die ihren Heizbedarf ebenfalls mit elektrischem Strom erzeugen.

Der Wärmebedarf eines Haushalts setzt sich zusammen aus dem Bedarf für die Raumheizung und für das Warmwasser. Dabei stellt die Heizung in der Regel den größten Verbraucher dar.

Ein zusätzlicher Unterschied zum Stromverbrauch besteht in dem dynamischen Verhalten der Wärmeverbraucher. Aufgrund der Wärmeübergangskoeffizienten und Trägheit der Wassermassen ergeben sich wesentlich größere System-Zeitkonstanten für die Wärmeversorgung.

Hinzu kommt, daß viele Haushalte ihre Wärme über hauseigene Brenner erzeugen, deren Brennstoffeinspeisung nicht elektronisch erfaßt wird. Die Registrierung des Verbrauchs erfolgt in der Regel über mechanische Zählwerke. Der Einbau einer elektronischen Registrierung ist im Nachhinein ohne Eingriffe in die Rohrleitungen meist nicht möglich, zumal diese Maßnahmen ein Sicherheitsrisiko darstellen können.

Es existieren jedoch etliche Berechnungsprogramme, mit deren Hilfe der Wärmebedarf eines Gebäudes ermittelt werden kann.

Die Bestimmung des Energieverbrauchs über größere Zeiträume ist aber auch mit den eingebauten Zählern möglich.

In Deutschland teilte sich der Energieendverbrauch von 9197 PJ im Jahre 1995 wie folgt auf die einzelnen Verbrauchersektoren auf [5.1]:

Industrie	***Haushalt***	***Kleinverbraucher***	***Verkehr***
26,9%	**28,0%**	**17,0%**	**28,1%**

Tabelle 5.9 Endenergieverbrauch Deutschland 1995

Der Energieverbrauch des Haushaltssektors läßt sich weiter nach den Bedarfsarten aufschlüsseln mit dem folgenden Ergebnis:

Prozeßwärme	***Mechanische Energie***	***Raumheiz-wärme***	***Information & Kommunikation***	***Beleuchtung***
15%	**5%**	**76,6%**	**1,9%**	**1,5%**

Tabelle 5.10 Endenergieverbrauch eines privaten Haushalts

Der Anteil *Prozeßwärme* kann weiter unterteilt werden in etwa 12% Warmwasser und 3% sonstige Wärme. Somit werden fast **92%** der Energie für die Wärmeerzeugung eingesetzt.

Daraus ergibt sich im Mittel für Haushalte ein Energie-Verhältnis von Strom zu Wärme von nahezu eins zu zehn. Es gilt also für private Haushalte im Jahresmittel

$$\boxed{s_{Mittel} = \frac{Stromverbrauch}{Wärmeverbrauch} \approx \frac{1}{10}}. \tag{5.5}$$

Völlig analog wie bei der Erfassung der Stromverbauch-Ganglinien ist der Wärmeverbrauch zu analysieren. Dabei existiert allerdings zusätzlich das Problem, daß sich der Verbrauch hier auf zwei Bereiche verteilt. Dies ist zum einen der Warmwasserbedarf und zum anderen die Raumheizung. Die Versorgung beider Verbraucher erfolgt in der Regel durch den gleichen Kessel und kann somit nicht ohne weiteres separat erfaßt werden.

Der Warmwasserbedarf läßt sich nach VDI82 für Wohnungen mit Hilfe der folgenden Werte abschätzen [5.5]:

	Warmwasserbedarf in Liter / (Tag und Person)		**spezifische Nutzwärme in Wh / (Tag und Person)**
	ϑ_{WW} = 60°C	ϑ_{WW} = 45°C	
niedriger Bedarf	10 bis 20	15 bis 30	600 bis 1200
mittlerer Bedarf	20 bis 40	30 bis 60	1200 bis 2400
hoher Bedarf	40 bis 60	60 bis 120	2400 bis 4800

Tabelle 5.11 Warmwasserbedarf für Wohnungen [VDI82]

Für einen durchschnittlichen Haushalt mit 2,2 Personen würde dies einen Energiebedarf für Warmwasser bei mittlerem bis hohem Bedarf von schätzungsweise 5,28 kWh/d bis 10,56 kWh/d bedeuten. Damit liegt der Energiebedarf etwa auf etwa gleichem Niveau wie der Stromverbrauch. Den Energieverbrauch für ***Warmwasser*** kann man mit guter Näherung als ***unabhängig von der Jahreszeit*** betrachten.

Die durchschnittliche Verteilung des Energieverbrauchs auf die Sektoren Strom, Warmwasser und Heizung für die meisten heute vorhanden Gebäude in Deutschland zeigt die folgende Tabelle [5.6]:

Heizung	***Warmwasser***	***elektr. Strom***
250 kWh/(m²a)	25 kWh/(m²a)	30 kWh/(m²a)

Tabelle 5.12 Derzeitiger Energieaufwand deutscher Wohnhäuser

Nach VDI 2067, Blatt 1 ist die Heizgrenztemperatur das Tagesmittel $\vartheta_{L,m}$ = 15°C der Lufttemperatur. Liegt während eines Tages die mittlere Lufttemperatur darunter, so spricht man von einem "***Heiztag***".

Die Heizperiode liegt innerhalb der "***Heizzeit***", die vom 1. September bis zum 31. Mai des Folgejahres dauert. Somit gelten die Monate Juni, Juli und August als Sommermonate [5.7].

Den Jahresgang der Lufttemperatur im Monatsmittel kann man für das mitteldeutsche Flachland mit guter Näherung mit der folgenden Formel beschreiben

$$J_{L,\,Monat} = \left[8{,}6 + 9{,}3 \cdot \cos\left(\frac{2p}{12} \cdot m + 2{,}766 \right) \right] \;\; [\;°C\;] \quad \text{mit} \quad m \equiv Monat\,, \tag{5.6}$$

mit einem Maximum im Juli von 17,8°C und einem Minimum im Januar von -0,6°C [5.8]. Folglich ergibt sich dazu für die Lastganglinie der Heizlast ein komplementärer Verlauf, ähnlich der Stromverbrauchscharakteristik.

Ausgehend vom Jahres-Endenergieverbrauch deutscher Haushalte von 1995 lassen sich für weitere Abschätzungen folgende Verhältnisse festhalten

$$\frac{Strom}{Heizung} = \frac{8{,}4}{76{,}6} \approx 0{,}11 \qquad \text{sowie} \qquad \frac{Strom}{Prozeßwärme} = \frac{8{,}4}{15} = 0{,}56\,. \tag{5.7}$$

Geht man auch hier von einem Jahres-Stromverbrauch für einen ***durchschnittlichen Haushalt*** von 3146 kWh/a sowie etwa 8,6 kWh/d aus, so führen die obigen Verhältniszahlen zu den entsprechenden ***"normierten" Wärme-Verbrauchszahlen***:

$$\overline{P}_{a,Heizung} \approx \frac{3146}{0{,}11} = 28600 \; \left[\frac{kWh}{a} \right] \tag{5.8}$$

und

$$\overline{P}_{a,\,Prozeßwärme} \approx \frac{3146}{0{,}56} = 5618 \; \left[\frac{kWh}{a} \right]. \tag{5.9}$$

Da der Prozeßwärme-Bedarf näherungsweise als unabhängig von der Jahreszeit betrachtet werden kann, erhält man so einen Wert von 15,4 kWh/d als konstante Größe:

$$\overline{P}_{d\,,Prozeßwärme} \approx \frac{3146}{0{,}56 \cdot 365} \approx 15{,}4 \; \left[\frac{kWh}{d} \right] \quad \text{für alle Tage.} \tag{5.10}$$

Der Verlauf des Heizenergie-Bedarfs kann auf ähnliche Weise wie die Strom-Ganglinie beschrieben werden. Setzt man die minimale Heizleistung in die Mitte der Sommermonate Juni, Juli und August, so liegt das Minimum Mitte Juli etwa beim Tag 196. Dies fällt dann ungefähr auch dem Maximum der mittleren Lufttemperatur zusammen.

Für den jahreszeitlichen Verlauf der Heizlast ergibt sich somit approximativ:

$$\overline{P}_{d,Heizung} = 78{,}36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0{,}232\right)\right) \quad \left[\frac{kWh}{d}\right] \quad \text{mit} \quad d \equiv Tag\,. \tag{5.11}$$

Der gesamte Wärme-Energiebedarf kann durch hinzufügen der additiven Größe für die Prozeßwärme dann ebenfalls formuliert werden:

$$\overline{P}_{d,Wärme} = \left\{15{,}4 + 78{,}36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0{,}232\right)\right)\right\} \quad \left[\frac{kWh}{d}\right] \quad \text{mit} \; d \equiv Tag \tag{5.12}$$

Ausgleichskurve der Jahresganglinie für den durchschnittlichen Haushalt

Bildlich dargestellt kann man dann folgenden Lastgang für die Wärme erkennen:

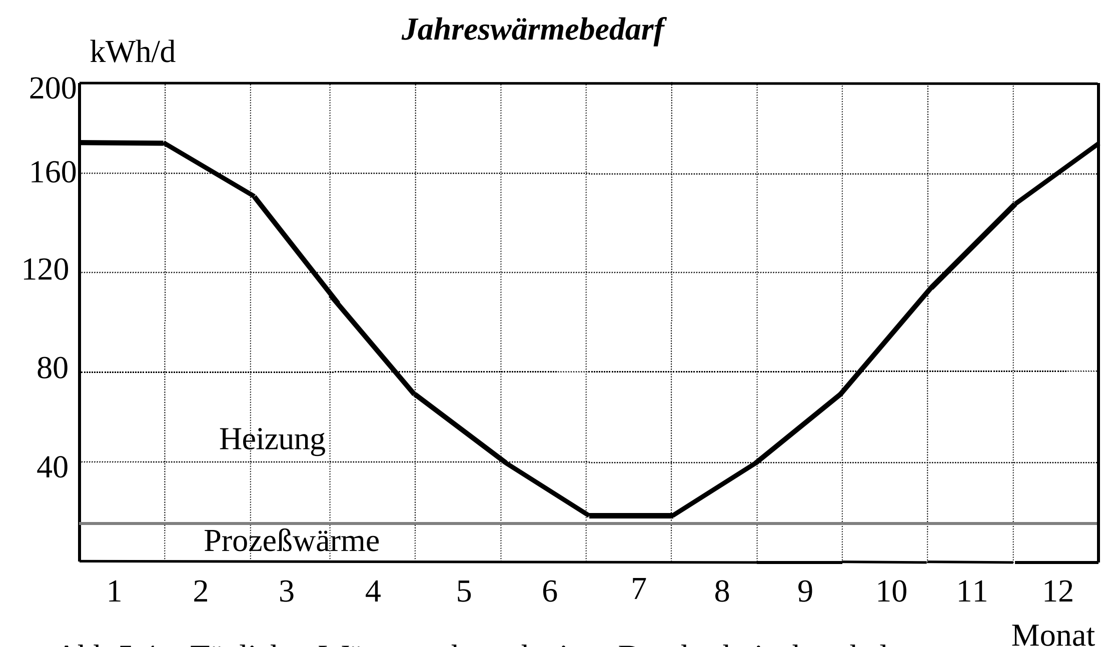


Abb 5.4 Täglicher Wärmeverbrauch eines Durchschnittshaushaltes

Aufgrund der Normierung des Wärmeverbrauchs auf den durchschnittlichen Strombedarf, ergibt sich die Umrechnung auf einen ***beliebigen Haushalt*** in der gleichen Weise wie bei dem elektrischen Strom:

$$P_{d,Wärme} = z \cdot \overline{P}_{d,Wärme} \quad \text{mit} \quad z = \frac{Jahres - Stromverbrauch}{3146 \quad kWh/a} \tag{5.13}$$

Ausgleichskurve der Jahresganglinie für einen allgemeinen Haushalt

Im Gegensatz zum Stromverbrauch hängt der wöchentliche und tägliche Verlauf der Lastgangkurve weniger vom menschlichen Verhalten, als vielmehr vom Gang der Außentemperatur [5.7]. Natürlich sorgen auch die verstärkten Aktivitäten der Hausbewohner, die für die Extremwerte des Stromverbrauchs verantwortlich sind, im Zuge der Umsetzung in Wärmeenergie für eine gewisse Entlastung des Heizbedarfs.

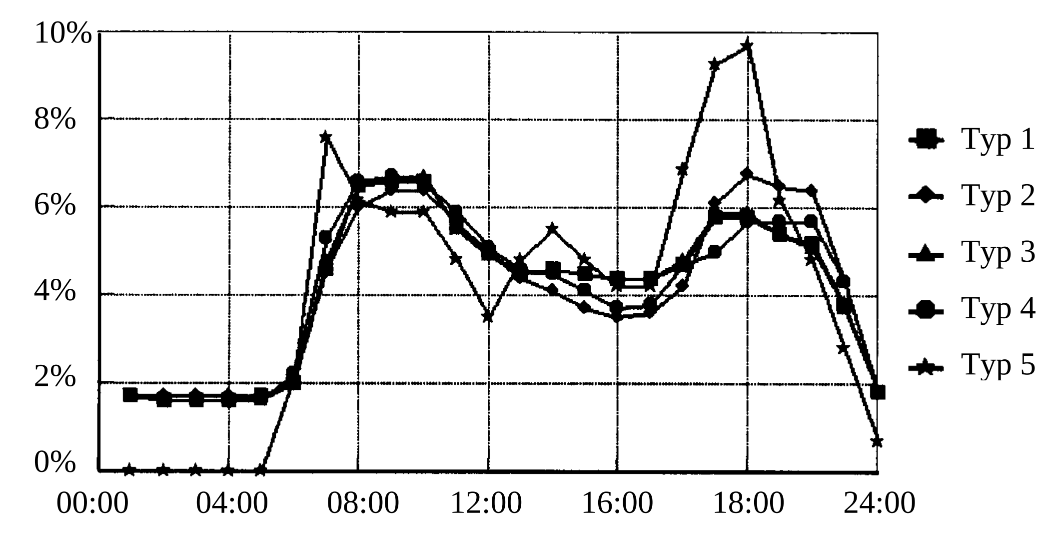
Betrachtet man den Tagesgang der Lufttemperatur, so erkennt man einen klaren Zusammenhang mit dem zeitlichen Verlauf der Sonneneinstrahlung. Leicht verzögert zum Mittagsstand der Sonne erreichen die Tagestemperaturen ihre Höchstwerte zwischen 12:00 und 18:00 Uhr. Demzufolge ergibt sich für die auf die Außentemperatur abgestimmte Heizleistung ein Minimum während dieser Zeit.

Der zeitliche ***Verlauf einer Heizkurve*** kann grob in ***4 Phasen*** eingeteilt werden:

1. *Nachtbetrieb mit niedrigster Leistung von 00:00 bis 06:00 Uhr*
2. *ausgeprägtes Vormittags-Maximum von 06:00 bis 12:00 Uhr*
3. *flaches Mittags-Minimum von 12:00 bis 18:00 Uhr*
4. *kleineres Nachmittags-Maximum 18:00 bis 24:00 Uhr*

Der Warmwasserverbrauch jedoch zeigt auch zur Mittagszeit ein Maximum, da dieser genauso wie elektrischer Strom vom menschlichen Nutzerverhalten geprägt wird. Die folgende Abbildung zeigt Verbrauchskurve typischer Tage [5.9]:

relative Wärmelast, Tagessumme = 100%



Typ 1: trüber Wintertag, Typ 2: heiterer Wintertag, Typ 3: trüber Tag Übergangszeit
Typ 4: heiterer Tag Übergangszeit, Typ 5: Sommertag

Abb. 5.5 Tagesverläufe der Wärmelast für Wohngebäude

5.3 Korrelation des Strom-Wärme-Verbrauchs

Entscheidend für die Auslegung und Betriebsführung einer Kraft-Wärme-Kopplung ist der Gleichzeitigkeits-Verlauf des Strom- und Wärme-Bedarfs. Je größer die Wahrscheinlichkeit für die gleichzeitige Anforderung von Strom und Wärme ist, und zudem das Verhältnis von Strom zu Wärme dem Wirkungsgrad entgegenkommt, desto besser läßt sich eine effektive KWK realisieren.

Der jahreszeitliche Verlauf des Strom-Wärme-Verhältnisses kann mit Hilfe der vorgestellten Näherungsformeln für einen allgemeinen Haushalt approximativ angegeben werden:

$$s_d = \frac{z \cdot \overline{P}_{d,Strom}}{z \cdot \overline{P}_{d,Wärme}} = \frac{8{,}6 + 1{,}6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right)}{15{,}4 + 78{,}36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0{,}232\right)\right)} . \tag{5.14}$$

Ausgleichskurve der Jahresganglinie für das Strom-Wärme-Verhältnis

Aufgrund der Normierung auf den Stromverbrauch kürzt sich hierbei der Umrechnungsfaktor z für einen allgemeinen Haushalt heraus, so daß die obige Formel unter den gemachten Annahmen allgemein gültig ist.

Daraus ergibt sich näherungsweise der folgende Verlauf für die Jahresganglinie:

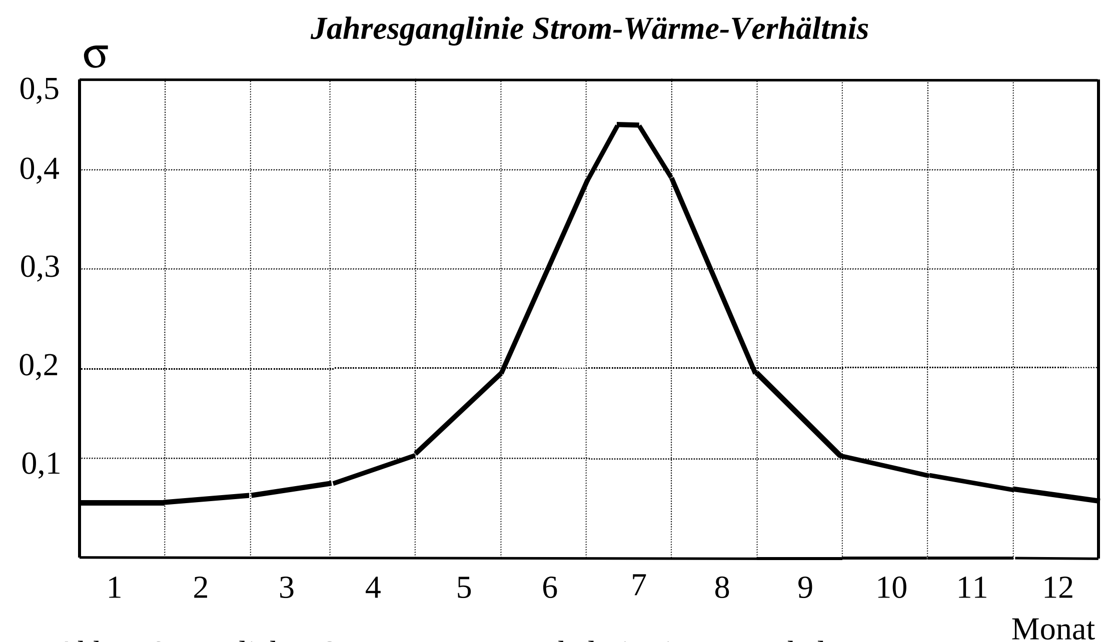


Abb. 5.6 Tägliches Strom-Wärme-Verhältnis eines Haushalts

In der Regel ist in der Realität das Minimum des Wärmeverbrauchs flacher und erstreckt sich über die Monate Juni, Juli und August [5.10]. So fällt der Verbrauch im Sommer etwas niedriger aus, als es die Näherungsformel angibt. Dafür ist der Verbrauch in den Wintermonaten entsprechend etwas höher. Infolgedessen ist das Maximum der Verhältniskurve in der Realität etwas breiter.

Teilt man das Jahr vereinfachend in Winter (Oktober bis März), und Sommer (April bis September) auf, so kann man für private Haushalte grob überschlägig mit einem Strom-Wärme-Verhältnis von *1:17 im "Winter"* sowie von *1:3 im "Sommer"* rechnen, wenn kein Strom zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird. Dies hat sich bei der Auswertung eigener Messungen sowie Lastkurven aus der Literatur als brauchbare Annahme insbesondere für freistehende Einfamilienhäuser erwiesen.

Nach der Klärung des approximativen Verlaufs des Strom-Wärme-Verhältnisses bezüglich des Jahresverlaufs, ist verfeinernd die Abstimmung von Strom und Wärme während eines Tagesablaufs zu klären. Zu diesem Zweck wird analog zum Tagesverlauf des Stromverbrauchs ein "typischer Sommertag" sowie ein "typischer Wintertag" dargestellt:

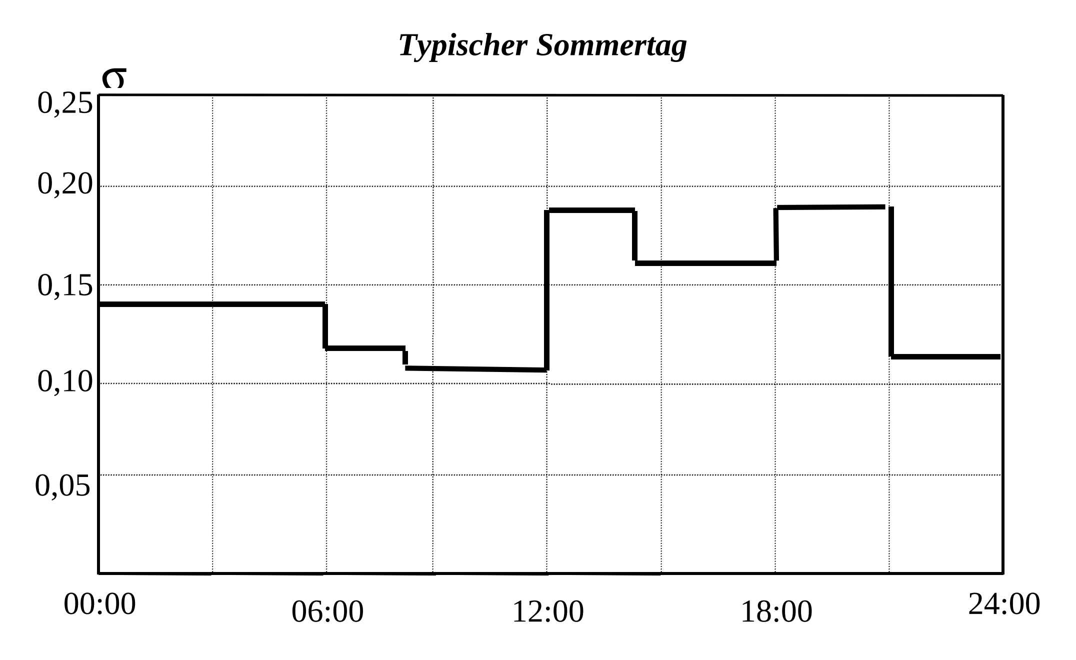


Abb. 5.7 Strom-Wärme-Verhältnis eines Haushalts im ***Sommer***

Die Näherungsformeln nutzend wurde dabei für den *typischen Sommertag* von einem Stromverbrauch von 7,439 kWh und dem rechnerisch dazugehörigen Wärmeverbrauch von etwa 51 kWh ausgegangen. Dies entspricht einem Tag von Mitte Mai bis Anfang Juni, also einem heiteren Tag in der Übergangszeit (Typ 4).

Für einen repräsentativen Wintertag sind dies ein Stromverbrauch von 10,123 kWh und ein Wärmebedarf von 172 kWh.

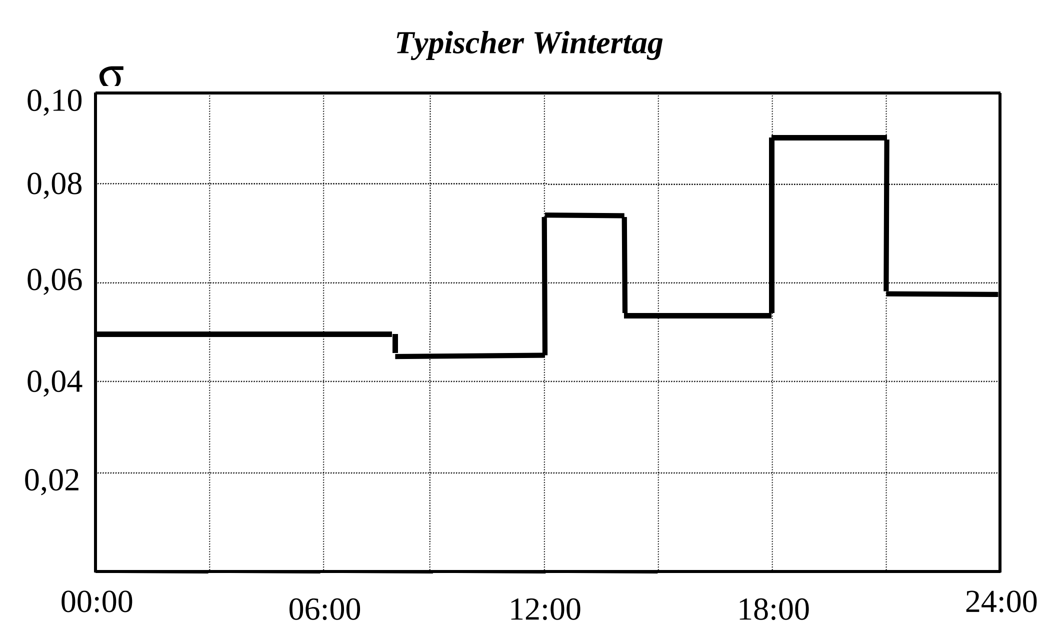


Abb. 5.8 Strom-Wärme-Verhältnis eines Haushalts im ***Winter***

Zur Auslegung des Hybridsystems sind diese Strom-Wärme-Verhältnisse mit der Einstellbarkeit des elektrischen Wirkungsgrades der Kraft-Wärme-Kopplung in Einklang zu bringen. Außerdem ist dem zeitlichen Verlauf des Strom- und Wärmebedarfs eine repräsentative Ausbeute-Funktion der Photovoltaikanlage gegenüberzustellen. Diese Zusammenhänge werden im Rahmen der Dimensionierung des Hybridsystems eingehend dargestellt. Vorab sind jedoch noch die physikalischen Eigenschaften des Dampfmaschinen-Prozesses aufzuzeigen, sowie das Aufbauprinzip des Gesamtsystems mit seinen funktionalen Zusammenhängen zu klären.

Die Wärmeschutzverordnung vom 1.1.1995 mit Zustimmung der EU schreibt einen Wärmeverbrauch abhängig vom Verhältnis der äußeren Hausoberfläche zum umbauten Raum vor. Für große Familienhäuser ergibt sich danach maximal ein Wert von 54 kWh/(m²a), und für Ein- und Zweifamilienhäuser maximal 100 kWh/(m²a). Wird ein niedrigerer Wert erreicht, so handelt es sich um Niedrigenergiehaus [5.6].

Außerdem haben die Nutzer eines Gebäudes einen entscheidenden Einfluß auf die Energieverbräuche. Felduntersuchungen haben zum Beispiel gezeigt, daß auch in baugleichen und vergleichbar ausgestatteten Gebäuden der Heizwärmeverbrauch um den Faktor zwei schwanken kann [5.10]. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die hier erarbeiteten Auslegungsgrundlagen individuell anzupassen.

Diese Perspektiven werden abschließend mit dem Auslegungsspielraum des Hybridsystems verglichen, um zu zeigen, in welchen Grenzen das System noch sinnvoll eingesetzt werden kann. Mit Rücksicht auf den entscheidenden Parameter Strom-Wärme-Verhältnis ist dabei ebenfalls das Einsparungspotential des Stromverbrauchs mit einzubeziehen.

6. Kraft-Wärme-Kopplung mit Dampfmaschine

Nach der Darstellung der wesentlichen thermodynamischen Grundlagen zum Verständnis der Ausführungen zum Dampfkraftprozeß, wird der Clausius-Rankine-Prozeß erläutert. Daran schließt sich eine technische Beschreibung der "*klassischen*" *Dampfmaschine* an, gefolgt von Ausführungen zur Nutzung dieser Maschine zur Kraft-Wärme-Kopplung. Dabei wurde Wert darauf gelegt, die Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge so herauszuarbeiten, daß sie auch als Grundlage für "*moderne*" Konstruktionen gültig sind.

6.1 Thermodynamische Grundlagen

Neben der ***Energie*** ist die ***Entropie*** eine der fundamentalsten Größen der Thermodynamik. Die meisten umgangssprachlich formulierten Aussagen erhalten ihre physikalisch korrekte Form, wenn man darin vorkommende Wörter wie "Wärme" oder "Wärmemenge" durch das Wort "Entropie" ersetzt. Denn die Zustandsfunktion Entropie stellt ein Wärmemaß dar und ist damit eine mengenartige Größe wie die Energie. Mengenartige Größen beziehen sich auf einen Raumbereich und sind damit "extensive" Größen. Normiert man hingegen auf diesen Raumbereich, so ergibt sich eine zugehörige "intensive" Größe.

Die außerordentliche Bedeutung dieser Begriffe wird durch die folgende Formulierung der Hauptsätze der Thermodynamik deutlich.

Erster Hauptsatz:

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden.

Zweiter Hauptsatz:

Entropie kann zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden.

Im Gegensatz zur Energie verfügt die Entropie über ein Bezugsniveau, das durch einen weiteren Hauptsatz festgelegt wird.

Dritter Hauptsatz:

T ® 0 genau dann, wenn S ® 0

Die abstrakte Struktur der mathematischen Formulierung der physikalischen Gesetze ergibt sich aus der Existenz zahlreicher Analogien in den verschiedensten Abläufen der Natur.

Durch diese übergeordnete Systematisierung ist es möglich, sich die Bedeutung einer speziellen Größe leichter zugänglich zu machen. Die folgende Tabelle 6.1 zeigt die wesentlichen Zuordnungen [6.1].

	Extensive Größe	**Intensive Größe**	**Stromstärke**	**Leistung**
Mechanik	Impuls $\vec{p}$	Geschwindigkeit $\vec{v}$	Kraft $\vec{F}$	$P = \vec{v} \cdot \vec{F}$
Elektrizitäts-lehre	elektrische Ladung Q	elektrisches Potential j	elektrische Stromstärke I	$P = U \cdot I$
Thermodynamik	Entropie S	Temperatur T	Entropie-stromstärke I_S	$P = T \cdot I_S$

Tabelle 6.1 Zuordnung physikalischer Größen

Äquivalent zu den ersten beiden Hauptsätzen folgt

$$dU = dQ + dW \tag{6.1}$$

und

$$dQ = T \cdot dS \quad \text{für } \textit{reversible} \text{ Vorgänge} \tag{6.2}$$

sowie

$$dQ < T \cdot dS \quad \text{für } \textit{irreversible} \text{ Vorgänge} \tag{6.3}$$

Dies besagt, daß eine Änderung der ***Inneren Energie*** U im allgemeinen sowohl mit einem Entropiefluß Q, genannt ***Wärme***, als auch mit der Verrichtung von ***Arbeit*** W verbunden ist. Wesentlich dabei ist auch die Erkenntnis, daß damit auch die Möglichkeit Wärme und Arbeit gegenseitig ineinander umzuwandeln gegeben ist.

Für technische Anwendungen ist es wichtig, sich in diesem Zusammenhang zu verdeutlichen, was hier unter Arbeit zu verstehen ist. Arbeit kann sowohl im System verbleiben, als auch nach außen abgegeben werden. Arbeit äußert sich in der Regel als ***Raumänderungsarbeit*** W_r und als ***Technische Arbeit*** W_t.

$$W_r = \int_{V1}^{V2} p \cdot dV \quad [Nm] \qquad \text{und} \qquad W_t = \int_{p1}^{p2} V \cdot dp \quad [Nm] \tag{6.4}$$

Bei der Nutzung technischer Arbeit macht man sich eine krafterzeugende Druckänderung dp zunutze, wobei in Folge durch Bewegung (***Kinetische Energie***) auch eine Volumenänderung dV im System erfolgt. Dies zeigt die enge Verknüpfung dieser Energien. Für technische Anwendungen ist insbesondere die Bilanz zwischen zugeführter Wärme und geleisteter technischer Arbeit von Bedeutung.

Thermodynamische Prozesse zur Erzeugung mechanischer Arbeit nutzen dazu ***fluide Medien***. Der thermodynamische Zustand solcher Medien ist durch die Angabe zweier Größen eindeutig bestimmt. Die dazugehörigen einander äquivalenten ***Zustandsfunktionen*** nennt man ***Thermodynamische Potentiale***. Diese können durch eine Legendre Transformation ineinander umgewandelt werden [6.2].

Die folgende Aufstellung zeigt die wichtigsten Funktionen in einer Übersicht, sowie den Zugang zu den meßbaren Größen Temperatur, Volumen und Druck.

***<u>Thermodynamische Potentiale für fluide Medien</u>*:**

Innere Energie $U(S,V)$**:**

$$\frac{\partial U}{\partial S} = T \quad , \quad \frac{\partial U}{\partial V} = -p \tag{6.5}$$

Freie Energie $F(T,V)$**:**

$$F = U - T \cdot S \quad , \quad \frac{\partial F}{\partial T} = -S \quad , \quad \frac{\partial F}{\partial V} = -p \tag{6.6}$$

Enthalpie $H(S,p)$**:**

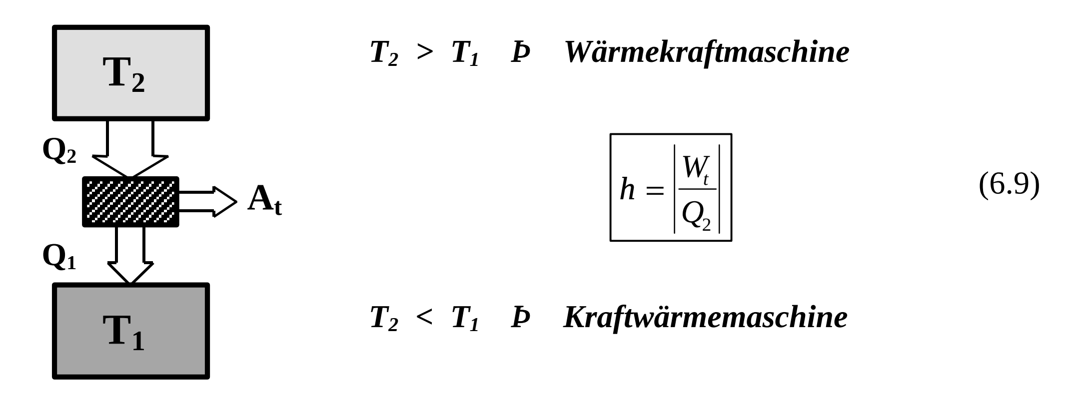
$$H = U + p \cdot V \quad , \quad \frac{\partial H}{\partial S} = T \quad , \quad \frac{\partial H}{\partial p} = V \tag{6.7}$$

Freie Enthalpie $G(T,p)$**:**

$$G = U + p \cdot V - T \cdot S \quad , \quad \frac{\partial G}{\partial T} = -S \quad , \quad \frac{\partial G}{\partial p} = V \tag{6.8}$$

Um eine, für technische Anwendungen zur Erzeugung mechanischer Arbeit relevante Bilanz von zugeführter Wärme und geleisteter Arbeit zu erhalten, ist es nötig, einen sogenannten ***Kreisprozeß*** zu betrachten. Dies ist ein Prozeß, bei dem das System, durch welches Wärme in Arbeit umgewandelt wird, wieder in seinen Anfangszustand zurückkehrt [6.3].

Vereinfachend kann man sich diesen Prozeß mit Hilfe zweier hinreichend großer unveränderlicher Wärmereservoirs unterschiedlicher Temperaturen mit Wärmefluß und Arbeitsabgabe vorstellen.



$T_2 > T_1 \Rightarrow$ Wärmekraftmaschine

$$\boxed{\eta = \left| \frac{W_t}{Q_2} \right|} \tag{6.9}$$

$T_2 < T_1 \Rightarrow$ Kraftwärmemaschine

Abb. 6.1 Vereinfachte Kreisprozeß-Darstellung

Der ***Wirkungsgrad*** gibt für eine Wärmekraftmaschine das Verhältnis der geleisteten Arbeit zur zugeführten Wärme an. Für reversible Prozesse ist die Entropieänderung des Systems gleich Null. Folglich kann man für den Wirkungsgrad des obigen Systems ableiten:

$$0 = \Delta S_{ges} = \frac{Q_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} \quad \Rightarrow \quad \eta_{rev} = \frac{A_t}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}\,. \tag{6.10}$$

Dieser Wirkungsgrad stellt die obere Grenze für thermische Prozesse dar und gilt auch für den sogenannten ***Carnot-Prozeß***. Deshalb spricht man hierbei auch von dem ***Carnot'schen Wirkungsgrad***, der als Vergleichsgröße zur Beurteilung von Prozessen herangezogen wird.

$$\boxed{\eta_C = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad , \quad \eta_{Prozess} \le \eta_C} \tag{6.11}$$

Die Aufnahmefähigkeit von Wärme ist eine stoffabhängige Eigenschaft, die sich durch die ***Wärmekapazitäten*** beschreiben läßt:

$$C_V \equiv \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_V \quad , \quad C_p \equiv \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p \quad \text{mit} \quad C_p - C_V = \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \tag{6.12}$$

Diese Zusammenhänge gelten allerdings nur, solange keine ***Phasenübergänge*** auftreten, die sich als Singularitäten dieser Kapazitäten äußern, da bei Zuführung der sogenannten ***latenten Wärme*** keine Temperaturerhöhung erfolgt [6.1]. Dieser Umstand ist insbesondere bei Dampfkraftprozessen von Bedeutung. Die Wärmekapazitäten sind in der Regel temperaturabhängige Funktionen. Näherungsweise approximiert man die Wärmekapazitäten häufig über einem Temperaturintervall mit einem konstanten Wert oder einer Polynomapproximation, um die aufgenommene Wärme als Integral über die Temperatur einfach bestimmen zu können.

6.2 Dampfkraftprozeß

Ein Kreisprozeß zeichnet sich dadurch aus, daß sich ein System anfangs und nach dem Ablauf des Prozesses im selben Gleichgewichtszustand befindet. Da *U* und *S* eindeutige Zustandsfunktionen sind, gilt

$$\oint dU = \oint dS = 0\,. \tag{6.13}$$

Gleiches gilt nicht für Arbeit und Wärme, da dA und dQ keine totalen Differentiale sind. Dies gilt auch für den ***Clausius-Rankine-Prozeß***, der bei Dampfkraftmaschinen, wie Kolbendampfmaschinen und Dampfturbinen, durchlaufen wird, um Wärmeenergie in mechanische Energie umzuwandeln [6.4].

Hierbei wird im allgemeinen Wasser verdampft bis zu einem definierten Arbeitsdruck, um dann in der Arbeitsmaschine entspannt zu werden. Anschließend wird der Abdampf dann in einem Wärmetauscher kondensiert und dem Prozeß erneut zugeführt.

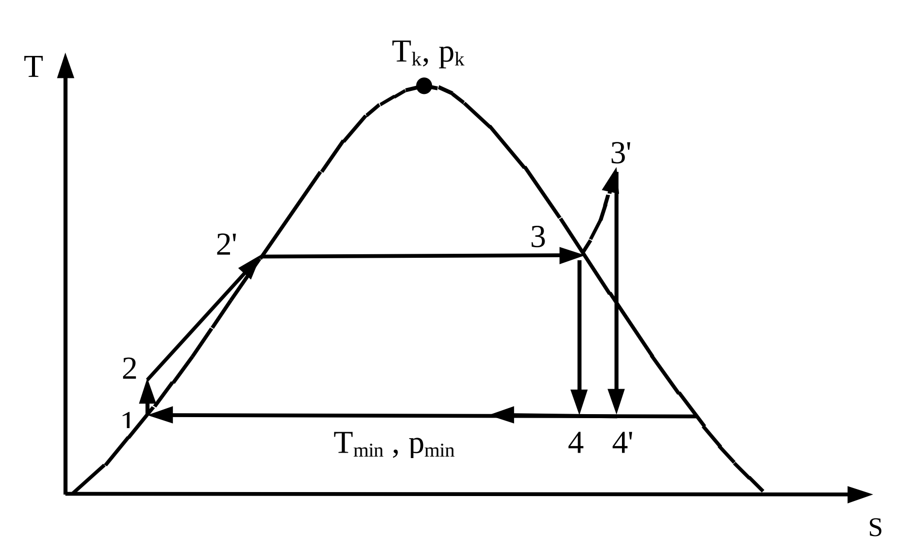


Abb. 6.2 Schematisierte Darstellung des Clausius-Rankine-Prozesses

1 - 2 isentrope Druckerhöhung durch eine Flüssigkeitspumpe
2 - 2' isobare Wärmezufuhr bis zur Siedetemperatur
2 - 3 isobare Wärmezufuhr im Damperzeuger ohne Überhitzung
3 - 3' isobare Wärmezufuhr im Dampferzeuger zur Überhitzung
3 - 4 bzw. 3 - 4' isentrope Entspannung
4 - 1 bzw. 4' - 1 isobare Wärmeabfuhr im Kondensator
Abfolge: (1 - 2 - 2' - 3 - 4 - 1) oder (1 - 2 - 2' - 3 - 3' - 4' - 1)

Der Clausius-Rankine-Prozeß ist also ein Isobaren-Isentropen-Vergleichsprozeß.

Für überschlägige Wirkungsgradberechnungen läßt sich im allgemeinen auf Grund der Inkompressibilität von Wasser die Differenz der spezifischen Enthalpien $h_2 - h_1$ vernachlässigen. Für die auf die Masse bezogenen spezifischen Größen erhält man

zugeführte Wärme $\quad q_{zu} = h_3 - h_1 \qquad (6.14)$

abgeführte Wärme $\quad |q_{ab}| = h_4 - h_1 \qquad (6.15)$

Kreisprozeßarbeit $\quad |w_t| = h_3 - h_4 \,. \qquad (6.16)$

Damit kann der ***Wirkungsgrad*** wie folgt bestimmt werden:

$$\boxed{h = \frac{|w_t|}{q_{zu}} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_1}}\,. \qquad (6.17)$$

Für überhitzten Dampf ist für 3 und 4 der Zustand für 3' und 4' einzusetzen.

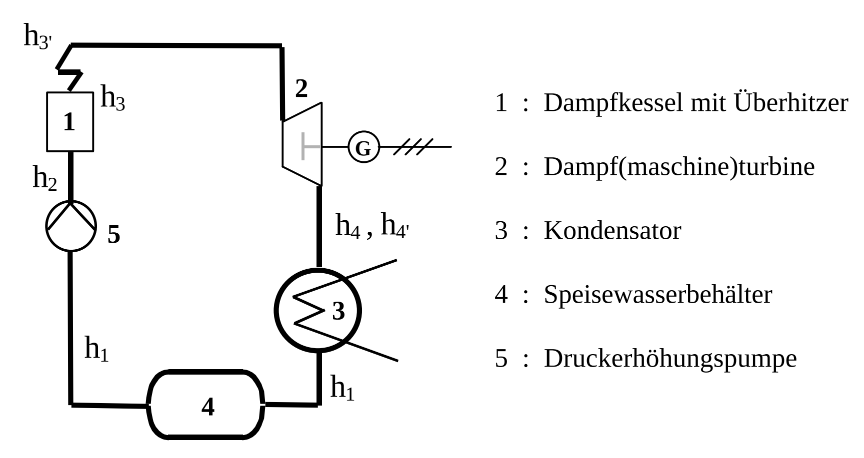


Abb. 6.3 Dampfkraftprozeß

Bei diesem Prozeß durchläuft das Wasser verschiedene thermodynamische Zustandsbereiche. Diese sind heißes ***Wasser***, ***Druck-Heißwasser***, ***Naßdampf***, ***Sattdampf*** und ***Heißdampf*** [6.5]. Diese Zustände sollen im folgenden erklärt werden.

Thermodynamische Größen, die sich auf siedendes Wasser beziehen, sind mit dem Zeiger ' gekennzeichnet, und für Sattdampf wird der Zeiger " benutzt.

Zunächst wird das Wasser ($J_{\min}$ bzw. $T_{\min}$) mit einer Druckerhöhungspumpe auf das Druckniveau des Dampfkessels gebracht. Bei diesem Druck wird das Wasser zum Sieden (J_S) gebracht mit der Energiezufuhr

$$h'(J_S) - h'(J_{\min}) = c_{pm}\Big|_{J_{\min}}^{J_S} \cdot (J_S - J_{\min}) \;, \quad c_{pm} \text{ mittlere Wärmekapazität.} \qquad (6.18)$$

Die Siedetemperatur ist dabei eine Funktion des Drucks. Den Zusammenhang zwischen Dampfdruck und Temperatur gibt die ***Clausius-Clapeyron-Gleichung*** wieder [6.3] :

$$\frac{dp}{dT} = \frac{r}{(v''-v')\cdot T} \qquad \text{mit} \quad r = (h''-h') \quad \textit{Verdampfungswärme}$$
$$\text{und} \quad (v''-v') \quad \text{spez. Volumenzunahme} \qquad (6.19)$$

Durch weitere Wärmezufuhr setzt Verdampfung ein und es entsteht ein Wasser-Dampf-Gemisch (Naßdampf), dessen Wasseranteil mit $x \in [0{,}1]$ angegeben wird.

Während der Verdampfung zwischen $x = 0$ und $x = 1$ bleibt die Temperatur des Gemisches konstant gleich der Siedetemperatur J_S.

Die dazugehörige jeweilige Enthalpie ist dann:

$$h_n = h' + x \cdot r \qquad \textit{feuchter oder nasser Dampf.} \qquad (6.20)$$

Die Verdampfungswärme nimmt mit steigendem Druck ab und verschwindet am ***kritischen Punkt*** mit $p_k = 221{,}29\,\text{bar}$, $J_k = 375{,}15$ °C.

Wird nach Erreichen des Sattdampfzustands weiter erhitzt, so steigt die Temperatur wie es den allgemeinen Gasgesetzen entspricht. Die Enthalpie wächst dann näherungsweise mit

$$h = h'' + c_{pm}\Big|_{J_S}^{J} \cdot (J - J_S) \quad , \quad c_{pm} \quad \textit{mittlere Wärmekapazität} \qquad (6.21)$$

In analoger Weise seien hier Näherungsformeln für die Entropien zusammengestellt:

$$s'(J_S) - s'(J_{\min}) = c_{pm}\Big|_{J_{\min}}^{J_S} \cdot \ln\left(\frac{T_S}{T_{\min}}\right) \quad , \quad \textit{Entropiezunahme zum Sieden} \qquad (6.22)$$

$$s'' = s' + \frac{r}{J_S} \quad , \quad \textit{Entropie des Sattdampfes} \qquad (6.23)$$

$$s_n = s' + x \cdot \frac{r}{J_S} \quad , \quad \textit{Entropie des Naßdampfs} \qquad (6.24)$$

$$s = s'' + c_{pm}\Big|_{J_S}^{J} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_S}\right) \quad , \quad \textit{Entropie des Heißdampfs} \qquad (6.25)$$

Zur praktischen Berechnung sind die Formeln, die sich auf gemittelte Wärmekapazitäten beziehen, wenig geeignet [6.6].

Die Wärmekapazitäten sind stark druck- und temperaturabhängig und die Mittelung ist sehr umständlich. Besser ist es, die verfügbaren umfangreichen Tabellenwerke und T,s- oder h,s-Diagramme zu benutzen [6.7].

Im allgemeinen kann man davon ausgehen, daß die Entspannung in der Dampfmaschine oder Turbine, entsprechend Abb.6.2, im Zweiphasengebiet endet und das Wasser nach der Wärmeabfuhr im Kondensator nur gering unterkühlt ist. Damit ergibt sich für die Wirkungsgradberechnung:

$$h_1 \approx h'(p_{\min}) \tag{6.26}$$

$$h_{4,4'} = h'(p_{\min}) + T_{\min} \cdot \left[s_{3,3'} - s'(p_{\min}) \right] \tag{6.27}$$

$$|q_{ab}| = T_{\min} \cdot \left[s_{3,3'} - s'(p_{\min}) \right] \tag{6.28}$$

$\Rightarrow$ mit (6.17)

$$\boxed{h_{rev} = 1 - \frac{T_{\min} \cdot \left[s_{3,3'} - s'(p_{\min}) \right]}{h_{3,3'} - h'(p_{\min})}}. \tag{6.29}$$

Der Gesamtwirkungsgrad für den realen irreversiblen Prozeß ergibt sich aus der Betrachtung der Wirkungsgradkette der beteiligten Komponenten wie Dampferzeuger (h_{DE}) , Dampfmaschine oder Turbine (h_{DM}), Generator (h_G) sowie der mechanischen Verluste (h_m). Insgesamt kann man den Wirkungsgrad dann wie folgt angeben:

$$h_{real} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} = h_{DE} \cdot h_{rev} \cdot h_{DM} \cdot h_m \cdot h_G \, . \tag{6.30}$$

Die wesentlichen Einflußparameter für den idealen Wirkungsgrad η_{rev} sind der Druck und die Temperatur des Arbeitsdampfes sowie der Druck im Kondensator.
In Anbetracht des Einsatzes einer "klassischen" Dampfmaschine wird für die folgenden Darstellungen der Abhängigkeiten des idealen Wirkungsgrades von diesen Parametern ein Dampfdruckbereich bis 10 bar gewählt.

Für Sattdampf und Heißdampf sind in den folgenden Abbildungen Kurven für verschiedene Kondensatordrücke (Temperaturen) von 0,1 bar (45,84°C), 0,4 bar (75,89°C), 0,8 bar (93,51°C) und 1,0 bar (99,63°C) eingezeichnet. Interessant ist es dabei festzustellen, daß die Kondensationstemperatur T_{min} (bzw. Druck p_{min}) auf den Wirkungsgrad in diesem Arbeitsbereich einen stärkeren Einfluß hat, als die Überhitzung oder ein höherer Dampfdruck.

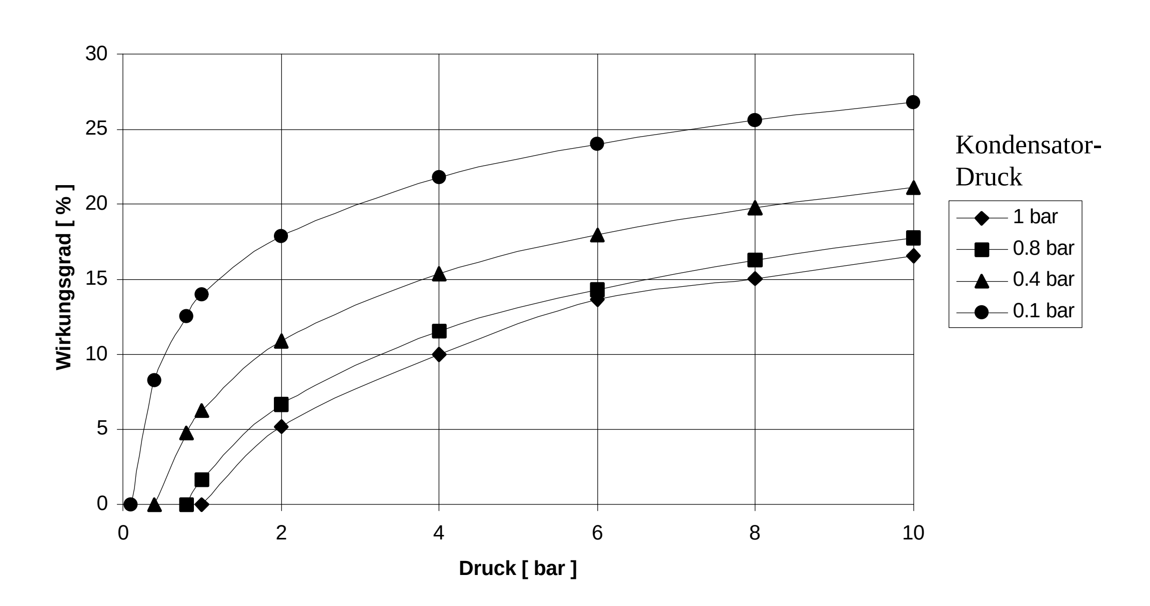


Abb. 6.4 Idealer Wirkungsgrad einer Dampfmaschine in Abhängigkeit vom Druck bei Sattdampf

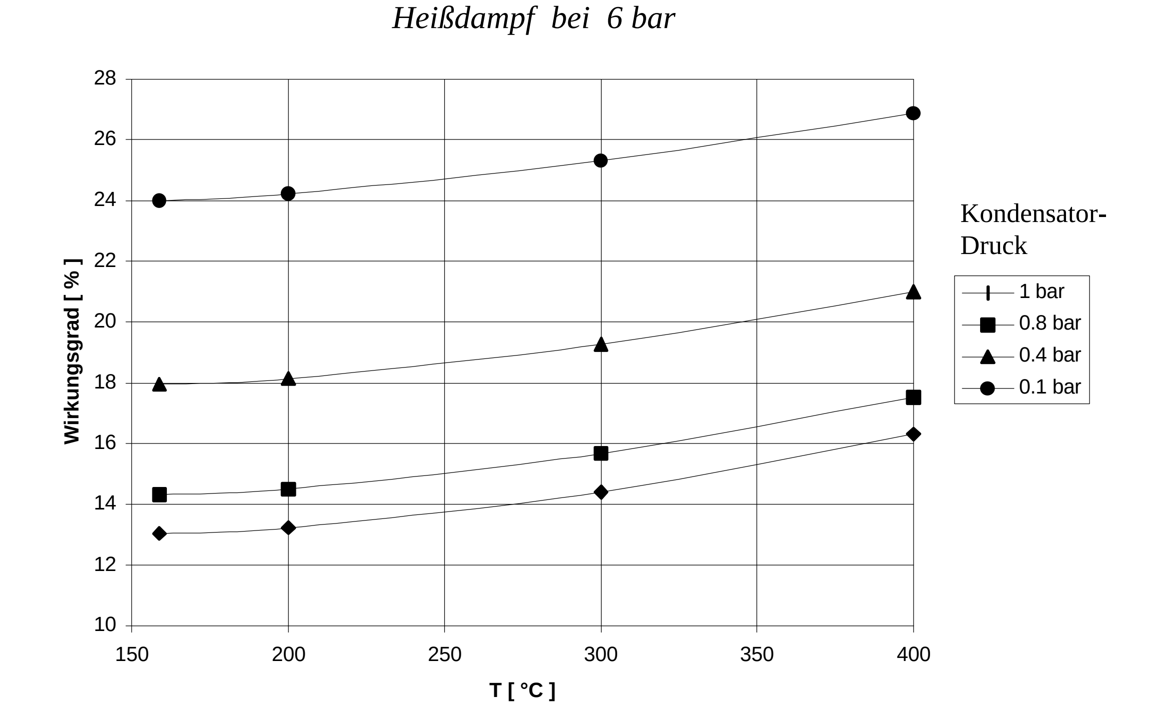


Abb. 6.5 Idealer Wirkungsgrad einer Dampfmaschine in Abhängigkeit von der Temperatur

Die folgende Graphik zeigt die Verhältnisse von Dampf bei 6 bar sowohl für Sattdampf, als auch für überhitzte Zustände, wenn der Kondensatordruck variiert wird.

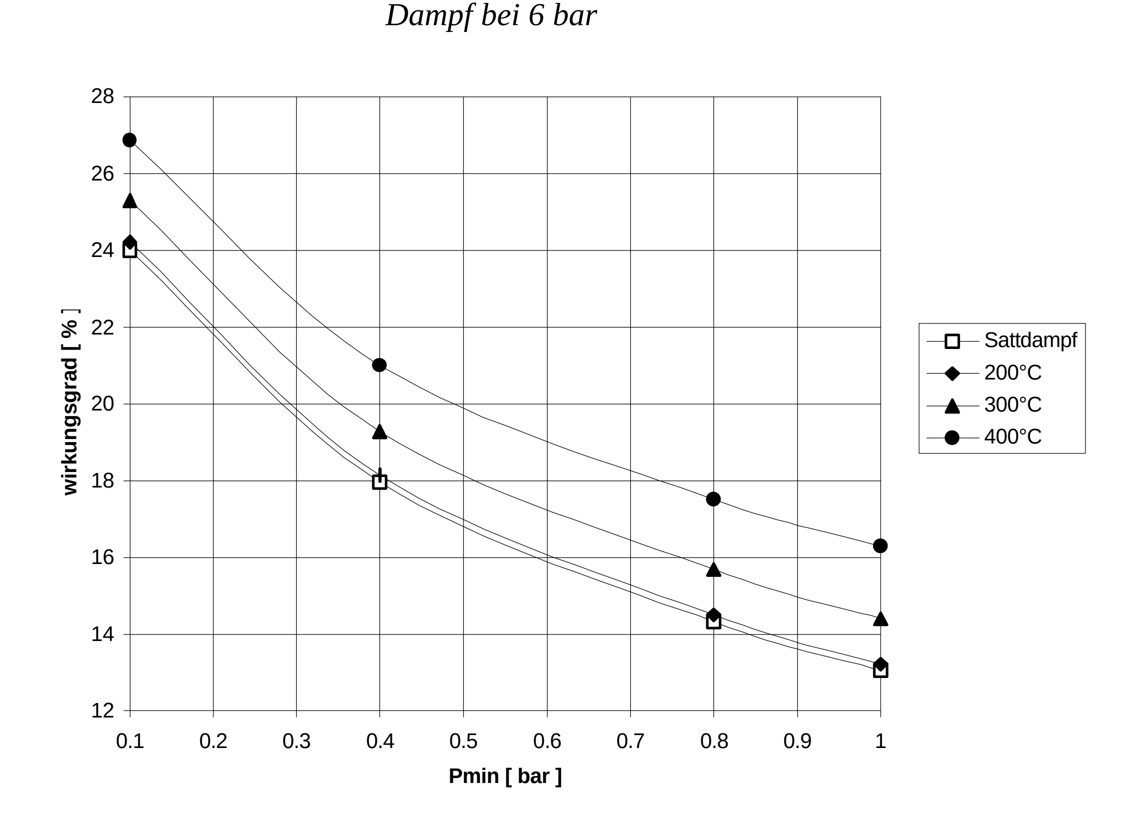


Abb. 6.6 Wirkungsgrad-Vergleich in Abhängigkeit vom Kondensatordruck

Dieser Umstand hat besondere Bedeutung für die gezielte Auskopplung der Wärme zur Versorgung von Wärmeverbrauchern im KWK-Betrieb. Ein wichtiger Parameter für die Kraft-Wärme-Kopplung ist zum Beispiel die momentan erforderliche Vorlauftemperatur für den Heizkreislauf. Dies hat aufgrund des im Wärmetauscher erforderlichen Temperaturgefälles rückwirkend Einfluß auf die Dampf-Seite und damit auf den Wirkungsgrad.

Alternativ zum konventionellen Dampfkraftprozeß könnte auch der sogenannte ***ORC-Prozeß*** (***Organic-Rankine-Cycle***) eingesetzt werden. Hier handelt es sich ebenfalls um einen Clausius-Rankine-Prozeß, allerdings wird an Stelle von Wasser ein organisches Arbeitsmittel im Kreislauf eingesetzt. ORC-Anlagen werden derzeit vornehmlich im Bereich Geothermie eingesetzt, da hierbei auch Quellen mit niedrigerem Temperaturniveau (<200°C) zur Stromerzeugung herangezogen werden können [6.8].

Dies sind robuste, kompakte, in sich geschlossene Anlagen, wobei aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmittels die eingesetzten Turbinen mit einem höheren Wirkungsgrad arbeiten.

Es sind auch bereits ORC-Anlagen für den Einsatz an ***Biomassefeuerungen*** kommerziell erhältlich. Bei einer typischen Auslegung mit einer Antriebstemperatur von 300°C können ORC-Anlagen einen elektrischen Wirkungsgrad von 15% erreichen. Ein Grund für das Verhalten dieser Arbeitsmittel sind geringere Enthalpiedifferenzen bei gleichen Temperaturverhältnissen wie bei Wasserdampf. Ebenso ist wegen der höheren Molekülmasse das spezifische Volumen bei gleichem Druck wesentlich geringer. Hierdurch wird der effiziente Einsatz billigerer einstufiger Turbinen möglich. Die elektrischen Leistungen solcher Systeme liegen derzeit etwa zwischen 100 kW und 1 MW [6.9].

Interessant in diesem Zusammenhang ist die Frage, inwieweit sich diese Erfahrungen auch auf "kleine" Dampfmaschinen moderner Bauart übertragen lassen, für den hier behandelten Einsatz im Leistungsbereich privater Haushalte.

Hier besteht eventuell eine Verbesserungsmöglichkeit in Kombination mit der Modernisierung von Dampfmaschinen. Die Einsatz-Rahmenbedingungen in photovoltaischen Hybridsystemen sind dabei aber die gleichen. Deshalb bleiben die in dieser Arbeit dargestellten Zusammenhänge auch für diese Zukunfts-Option gültig.

Aus diesem Grund beschränkt sich die folgende Beschreibung auf die allgemeingültigen maschinenbaulichen Gegebenheiten für Dampfmaschinen.

6.3 Dampfmaschine

Die Erkenntnis, daß Dampfkraft zur Bewegungserzeugung genutzt werden kann ist schon sehr alt. Aber erst im Jahre 1695 hat *Dionys Papin* ein Modell einer Dampfmaschine ausgeführt, wobei er ein Dampfvolumen unter Zugabe von kaltem Wasser kondensierte. 1699 wurde dieses Prinzip zur Hebung von Wasser durch *Savery* genutzt. Die erste eigentliche Dampfmaschine wurde 1705 von *Newcomen* konstruiert. *James Watt* führte viele Verbesserungen in der Dampfmaschinentechnik ein. Unter anderem automatisierte er das bisher von Hand vorgenommene Öffnen und Schließen der Hähne auf mechanischem Wege. Weiterhin baute er einen besonderen Kondensator und erzeugte den Druck auf den Kolben nicht mehr durch atmosphärische Luft, sondern durch den Dampfdruck. So baute Watt 1768 die erste für verschiedene Zwecke geeignete Dampfmaschine. Diese Maschine arbeitete als sogenannte "Balanciermaschine" mit 1,3 bar. Um 1802 wurden dann Maschinen gebaut, die mit einem Dampfdruck von 3 bis 4 bar arbeiteten. Danach wurde ein Bereich von 4 bis 6 bar bevorzugt. Diese Entwicklung war eng mit dem Fortschritt beim Kesselbau verknüpft, um die erforderlichen Druckbehälter bauen zu können [6.10].

Weitere Drucksteigerungen gingen mit der Entwicklung mehrstufiger Maschinen einher (9 bis 12 bar). Man erreichte damit um das Jahr 1900 mechanische Wirkungsgrade von etwa 15%. Ab 1866 entstand eine erhebliche zusätzliche Nachfrage nach Dampfmaschinen, denn Werner von Siemens hatte den Generator zur Stromerzeugung erfunden. Um 1930 konnte man die Dampfmaschinen entsprechend ihres absoluten Eintritts- und Austrittsdrucks grob wie folgt klassifizieren:

Druck [bar] absolut	Eintrittsdruck	Austrittsdruck Auspuffbetrieb	Austrittsdruck Kondensation
Einfachexpansion	8,0 - 12,0	1,0	0,25 - 1,0
Zweifachexpansion	10,0 - 15,0	1,0	0,25 - 1,0
Dreifachexpansion	12,0 - 18,0	1,0	0,25 - 1,0

Tabelle 6.2 Klassifizierung von Dampfmaschinen um 1930

In der Regel wurde dabei überhitzter Dampf genutzt. Der wesentliche Grund hierfür waren die auftretenden Wärmeverluste über die Zylinderwandungen. Bei dem Betrieb mit überhitztem Dampf ist aufgrund der im Vergleich zum Sattdampf schlechteren Wärmeleitfähigkeit die Wärmeabgabe an die Zylinderwand geringer. Dies gilt natürlich auch für die Zuleitungen. Wollte man hingegen eine teilweise Kondensation während der Füllung verhindern, so mußte durch die Überhitzung eine mittlere Wandtemperatur erreicht werden, die höher als die Sättigungstemperatur des Frischdampfes lag. Hierzu war eine verhältnismäßig hohe Überhitzung erforderlich. Es wurden auch Zylindermantelheizungen mit Dampf realisiert [6.11].

Weiterhin wurde nach den verschiedenen Möglichkeiten zur mechanischen Steuerung des Dampf-Ein-und Auslasses unterschieden, die mit dem Auftreten des sogenannten *schädlichen Raumes* verknüpft sind. Dieser wird in Prozent vom Hubvolumen angegeben und stellt Dampffüllungen dar, die nicht direkt zur Arbeiterzeugung beitragen. Die Größe der schädlichen Räume betrugen etwa 5 bis 10% des Kolbenhubvolumens. Außerdem traten häufig nicht zu vernachlässigende Dampfleckagen bei diesen Steuerungen auf.

Eine wesentliche Kennziffer zur Charakterisierung von Dampfmaschinen ist das *Verhältnis von Kolbenhub zum Kolbendurchmesser* s/D. So kann man grob *kurzhübige* und *langhübige* Maschinen unterscheiden, je nachdem ob das Verhältnis kleiner oder größer als eins ist. Eng damit verknüpft ist auch die Drehzahl n $[1/\mathrm{min}]$. Liefen die Watt'schen Maschinen noch mit eine Drehzahl von 10 bis 30, so erhöhte sich diese im Laufe der Zeit auf 120 bis 150 bei 'normalen' Maschinen.
Ausnahmen bildeten die sogenannten *Schnelläufer* mit mehreren hundert Umdrehungen pro Minute, welche für die Kupplung an elektrische Maschinen oder für rasch laufende Pumpen konzipiert waren.

Hierbei spielten auch Überlegungen zur Raum- und Gewichtsminderung eine Rolle. So wurden für den Schiffsbau Maschinen mit Drehzahlen von 500 bis 800 1/min realisiert. Eine Erhöhung der Drehzahl bewirkt einerseits eine Reduzierung der Kontaktzeit von Dampf und Wandungen und damit der Wärmeverluste. Andererseits steigen allgemein die Reibungsverluste, auch durch Drosselung des Dampfes in den Steuerungskanälen. Außerdem stiegen die Anforderungen an die ausgewogene Massenverteilung zur Vermeidung von Unwuchten. Auf den Dampfverbrauch hat die Drehzahl bei gleicher Leistung wenig Einfluß.

Heutzutage gibt es Dampfmotoranlagen für Frischdampf bis zu 500°C bei Drücken von 6 bis 60 bar. Der übliche Leistungsbereich liegt zwischen 40 kW und 2500 kW; und dies sowohl für Direktantrieb als auch zur Stromerzeugung. Dabei liegt der Drehzahlbereich zwischen 750 und 1500 1/min, wodurch eine direkte Kupplung zum Antrieb ohne Getriebe ermöglicht wird. Der ***innere Wirkungsgrad*** der Maschinen (Gütegrad) beträgt je nach Frischdampfzustand und Leistungsgröße zwischen 65% und 85%. Hierbei ist festzustellen, daß dieser in einem Regelbereich 1:4 sich wenig ändert und besser ist als der von Dampfturbinen gleicher Leistungsklasse [6.12].

Eine intensive internationale Suche nach einem Hersteller für Dampfmaschinen moderner Bauart in einem Leistungsbereich kleiner 20 kW führte zu keinem positiven Ergebnis. Die Spilling Werke in Hamburg scheinen heute die einzigen Hersteller und Lieferanten für neue Dampfmaschinen zu sein, allerdings derzeit nur ab 20 kW.

Ein Schwerpunkt dieser Firma liegt bei Schiffsantrieben. Aber es gibt auch Einsätze für Spilling-Maschinen als Gasentspannungsmaschinen für Erdgasentnahmestationen oder zur Verwertung von Biomasse mit und ohne Kraft-Wärme-Kopplung [6.13].

In jüngster Zeit gibt es auch Anwendungen bei Deponieentgasungen, wenn eine direkte Verbrennung einem Gasmotor ohne vorherige Brennstoffaufbereitung nicht möglich ist. Hier ist es wirtschaftlicher, das Deponiegas umweltverträglich zu verbrennen und mit dem Abgas in einem Abhitzekessel Dampf zu erzeugen (25 bar , 350°C) und diesen in einer Dampfmaschine zur Stromerzeugung umzusetzen [6.12].

Offen bleibt also die Frage, wie moderne Dampfmaschinen für einen Leitungsbereich um 5 kW zu konstruieren sind. Der heutige Maschinenbau verfügt über weit mehr Möglichkeiten, die früher schwer vermeidbaren Energieverluste auszuschließen. Dies betrifft sowohl die Reibungsverluste aufgrund der Lager und Schmierungen, als auch die Wärmeverluste, Steuerungsverluste und dergleichen. Ebenso bietet die heutige Zeit andere Alternativen bezüglich der Werkstoffauswahl. Sicherlich sind hier keramische Werkstoffe interessant. Die Technik der Schmierung und Ölung der Lager und Schieber früherer Zeiten entsprechen nicht den heutigen Maßstäben.

Die Aufgabe, eine den heutigen Bedürfnissen und technischen Rahmenbedingungen angepaßte Dampfmaschine für kleinste Leistungen zu bauen, kann nur von erfahrenen Maschinenbauern und Motorenherstellern aufgegriffen und gelöst werden.

Natürlich wird dies nur geschehen, wenn interessante Einsatzmöglichkeiten mit einem entsprechend entwicklungsfähigen Markt erschlossen, beziehungsweise gesehen werden. Vielleicht kann das in dieser Arbeit vorgeschlagene Konzept zur Nutzung in einem photovoltaischen Hybridsystem mit Kraft-Wärme-Kopplung einen Impuls hierfür darstellen.

Um dennoch experimentelle Erfahrungen mit dem Aufbau eines solchen Hybridsystems machen zu können, wurde auf ein alte Maschine zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um eine stehende Tandem-Maschine, dies ist eine zweistufige Maschine, wobei die beiden Zylinder übereinander angeordnet sind und beide Kolben über eine gemeinsame Stange geführt werden. Weitere Einzelheiten dazu und zum Versuchsaufbau werden im nächsten Kapitel präsentiert.

Für Dampfmaschinen, ob alt oder neu, gelten allgemeine Grundlagen die hier im folgenden skizziert werden, soweit sie für das Hybridsystem von Bedeutung sind. Dies betrifft insbesondere den Zusammenhang zwischen den thermodynamischen Bedingungen und den geometrischen, maschinenbaulichen Parametern, weil sich daraus Auslegungskriterien ergeben. Aus der Sicht eines Maschinenbauers stellt die Dampfmaschine eine Kolbenmaschine dar, die dadurch gekennzeichnet ist, daß potentielle Energie in mechanische Arbeit umgewandelt wird. Dies geschieht in der Regel mit Hilfe eines Hubkolbens, der bei Dampfmaschinen häufig beidseitig im Wechsel mit Dampf beaufschlagt werden kann und sich in einem druckfesten Zylinder periodisch hin und her bewegt. Dadurch ergeben sich zwei Füllungen bei jeder Periode.

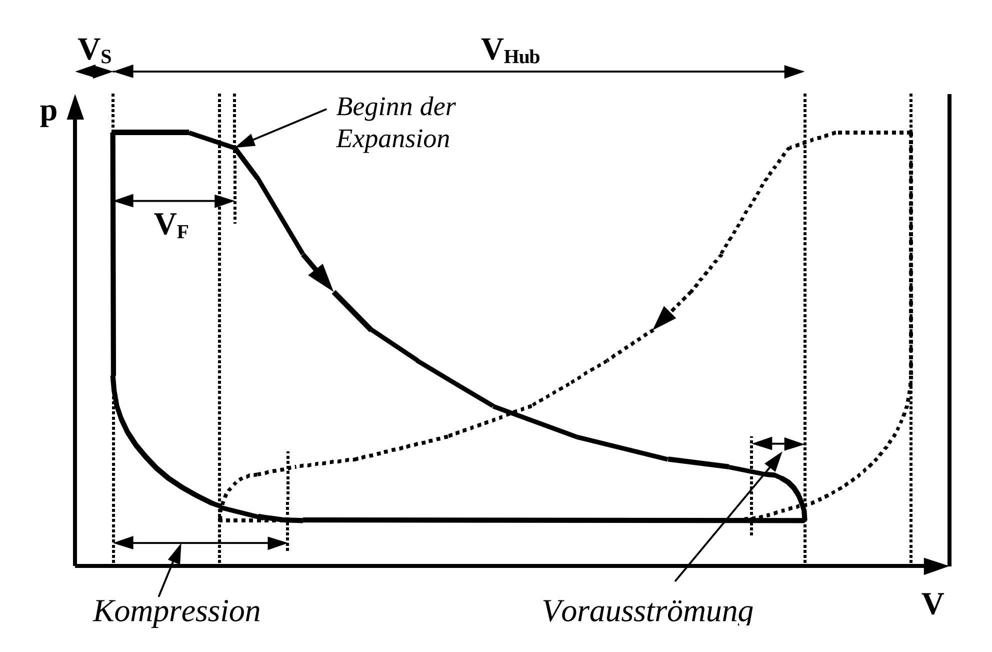


Abb. 6.7 Indikator- bzw. p,V-Diagramm einer Dampfmaschine

Beim Kolbenhingang findet das Einströmen und nach Schließen des Einlaßventils die Expansion des Dampfes unter Arbeitsabgabe und der Vorauslaß des Arbeitsmediums statt. Beim Rückgang des Kolbens erfolgt das Ausschieben, sowie das Verdichten und Voreinströmen des Dampfes nach Schließen des Auslaßventils. Durch den Vorauslaß wird ein Aufstauen des Mediums beim Ausschieben vermieden und die Ausschubarbeit sowie die Drosselverluste vermindert. Verdichten und Voreinströmen sind notwendig, um schlagartige Druckstöße in den Totpunkten zu vermeiden [6.11].

Die Umsetzung der Dampfenergie in mechanische Arbeit an der Welle der Kolbendampfmaschine erfolgt durch polytrope oder unter idealen Bedingungen adiabate Expansion. Die adiabate Expansion entsprechend des idealen Clausius-Rankine-Prozesses ist ein isentroper, also reversibler Prozess. Beim realen Prozeß bewirken Reibungsprozesse und thermische Verluste eine Erhöhung der Entropie.

Diesem Umstand trägt man durch die begriffliche Unterscheidung von ***indizierter*** und ***effektiver Leistung*** Rechnung, deren Verhältnis den ***Gütegrad*** darstellt.

Mit indizierter Leistung bezeichnet man Arbeitsleistung des Dampfes, wohingegen die effektive Leistung an der Antriebswelle der Maschine zur Kupplung zur Verfügung steht. Dieser sich daraus ergebende Gütegrad ist relativ unabhängig von der Maschinenauslastung.

Die indizierte Leistung P_i läßt sich bei n Umdrehungen pro Minute mit je zwei Füllungen wie folgt abschätzen [6.10]:

$$P_i = 2 \cdot \frac{p \cdot D^2}{4} \cdot p_m \cdot s \cdot \frac{n}{60} \quad \text{mit} \quad p_m = \textit{mittlerer Druck}. \tag{6.31}$$

Der mittlere Druck kann mit Hilfe des Indikatordiagramms ermittelt werden oder man schätzt diesen Wert ab, indem man die Expansion näherungsweise als Hyperbelfunktion (ideales Gas) ansetzt, und die Füllung sowie die Entleerung als isobare Vorgänge betrachtet. Diese Wahl ermöglicht eine Näherungsformel, die ausschließlich mit normierten Maschinenparametern auskommt und somit als 'Masterfunktion' dienen kann. Schließt man das schädliche Volumen mit ein, so erhält man [6.10]:

$$p_m = k \cdot p - \left(p_0 + p_V\right) \tag{6.32}$$

$p = \textit{Eingangsdruck}$, $p_0 = \textit{Ausgangsdruck}$, $p_V = \textit{Druckverluste}$

mit

$$k = u + (u + e) \cdot \ln\left(\frac{1+e}{u+e}\right) \tag{6.33}$$

und $u = \frac{V_F}{V_{Hub}} = \textit{Füllgrad}$, $e = \frac{V_S}{V_{Hub}} = \textit{relativer Schadraum}.$

Der Ausdruck p_V kennzeichnet dabei die Summe aller auftretender Verluste wie zum Beispiel durch Drosselung des Eintrittsdampfes, verfrühter Austritt, Druckverlust des abziehenden Dampfes, Kompression und Druckabfälle bei mehrstufigen Maschinen.

Für die Auslegung einer Maschine ist es wichtig, den Eingangsdruck so gut wie möglich zur Arbeitserzeugung auszunutzen. Ist der Frischdampfdruck vorgegeben, so hängt die effektive Arbeitsweise der Maschine wesentlich vom Enddruck p_{End} vor dem Ausströmen des Abdampfes gegen p_0 ab. Diese Werte stehen im Zusammenhang mit dem Füllgrad vor der Expansion. Näherungsweise kann man mit der folgenden Beziehung arbeiten [6.10]:

$$u = p_{End} \cdot \frac{1+e}{p} - e \qquad \text{bzw.} \qquad p_{End} = \frac{(u+e) \cdot p}{(1+e)} . \tag{6.34}$$

Die effektive Leistung lag bei den früheren Dampfmaschinen zu Anfang des Jahrhunderts etwa 10 - 20% niedriger als die indizierte Leitung.

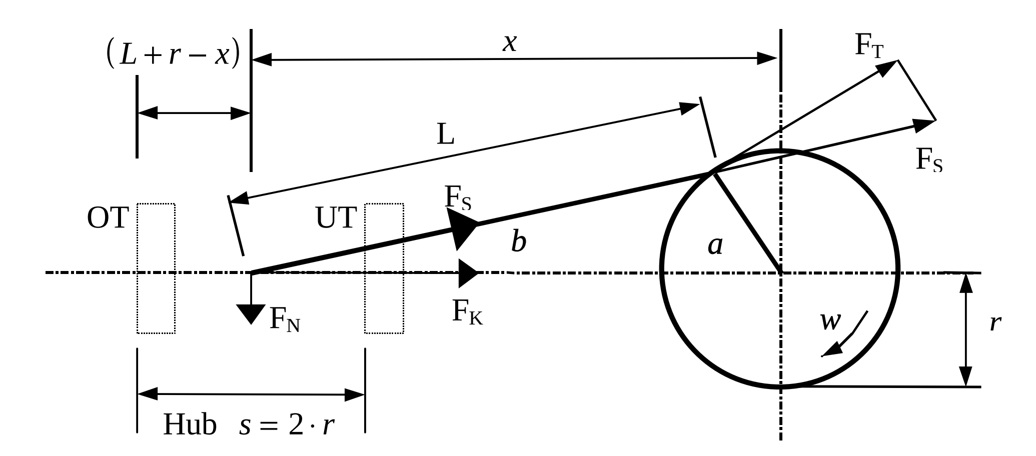
Geht man von einem idealen *adiabatischen* Expansionsvorgang aus, der in der Praxis meist nur annähernd erreicht werden kann, wenn der Endzustand nach der Entspannung von V_F immer noch im *Heißdampfbereich* liegt [6.11],[6.14], so kann die Leistung wie folgt abgeschätzt werden:

$$P_{Stufe} = 2 \cdot \frac{p}{4} \cdot D^2 \cdot s \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_{End} \cdot \left[\left(\frac{p}{p_{End}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] , \quad k = 1{,}30 . \tag{6.35}$$

Diese Abschätzung ist eher für die ersten Stufen einer mehrstufigen Dampfmaschine anwendbar.

Generell ist es jedoch besser, anhand der bekannten Eckwerte wie Temperaturen und Druck am Ein- und Ausgang eines Maschinen-Zylinders auf thermodynamische Tabellenwerke oder Diagramme zurückzugreifen [6.7],[6.15]. In der Nähe der betrachteten Arbeitspunkte können auch auf der Grundlage dieser Daten numerische Approximationen benutzt werden. Vorteilhaft sind hier gleich zweidimensionale Näherungsdarstellungen. Im Rahmen der Beschreibung der Simulation des Hybridsystems wird diese Vorgehensweise aufgegriffen.

Das Triebwerk der Dampfmaschine wandelt die oszillierende Kolbenbewegung in eine rotierende Bewegung der Antriebswelle. Hierfür wird bei Kolbenmaschinen wegen des einfachen Aufbaus und der geringen Übertragungsverluste meist ein ***Kurbeltrieb*** gewählt [6.16]. Um einen gleichförmigen Lauf zu gewährleisten, können mehrere Kolben versetzt arbeiten, und zum weiteren Ausgleich werden Schwungräder eingesetzt. Diese Gleichförmigkeit ist insbesondere wichtig für die Frequenzstabilität gekuppelter Generatoren zu Stromerzeugung.



OT, UT ≡ oberer- unterer Totpunkt

Abb. 6.8 Kräfte und Geometrie beim Kurbeltrieb

Der Cosinussatz liefert hier den Zusammenhang zwischen dem Winkel a und der Koordinate x des Kolbengelenks (Kreuzkopf): $L^2 = x^2 + r^2 + 2 \cdot x \cdot r \cdot \cos(a)$.

Damit ergibt sich für die Lagekoordinate x:

$$x = -r \cdot \cos(a) + \sqrt{L^2 - r^2 \cdot \sin^2(a)} \,. \tag{6.36}$$

Mit $l \equiv \frac{r}{L}$ und dem Prinzip der *virtuellen Verrückung* nach D' Alembert folgt für die Beziehung zwischen der Kolbenkraft und der Tangentialkraft an der Kurbel:

$$F_T = F_K \cdot \sin(a) \cdot \left(1 + \frac{l \cdot \cos(a)}{\sqrt{1 - l^2 \cdot \sin^2(a)}} \right). \tag{6.37}$$

Damit erhält man für das Drehmoment $M = F_T \cdot r$ und damit für die momentane mechanische Leistung $P_{mech} = M \cdot w$, mit $w = \frac{da}{dt}$ in Abhängigkeit von a .

Die Kolbenkraft ihrerseits ist abhängig von der momentanen Stellung x und damit auch von a . Es gilt somit

$$F_K = \left(p - p_x\right) \cdot p \cdot \frac{D^2}{4} \,, \qquad p_x = \textit{ Kolbendruck als Funktion von x.} \tag{6.38}$$

Das Drehmoment ist folglich eine Funktion des Drehwinkels a und ändert sich somit periodisch mit der Stellung des Kolbens. Dies gilt ebenfalls für die Kolbengeschwindigkeit und dessen Beschleunigung.

Das Drehmoment einer Dampfmaschine schwankt also infolgedessen beim Umlauf der Kurbelwelle um einen Mittelwert, den gekuppelte Maschinen im stationären Betrieb aufnehmen. Diese Schwankungen rufen Änderungen der Winkelgeschwindigkeit und des Energieflusses hervor. Die ***Laufruhe*** der Maschinen ist durch die Differenz der Extremwerte der Winkelgeschwindigkeiten bestimmt. Sie kann durch Vergrößerung der Schwungmassen der Maschinen oder durch Ändern der Kurbelfolge erhöht werden.

Zur Berechnung des ***Schwungrades*** wird das Drehmoment als Funktion des Kurbelwinkels und daraus die größte Energieänderung bestimmt, die es auszugleichen gilt. Mit dem Energiesatz kann für die geforderte Laufruhe dann das hierfür notwendige Trägheitsmoment bestimmt werden.

Als Maß für die Größe der Abweichung der Extremwerte der Geschwindigkeit wird der ***Ungleichförmigkeitsgrad*** d_S definiert:

$$d_S = \frac{w_{\max} - w_{\min}}{w_m} \quad , \quad w_m = \frac{w_{\max} + w_{\min}}{2} \quad \textit{Mittelwert.} \tag{6.39}$$

Damit läßt sich das erforderliche Schwungrad berechnen [6.16].

Da das Schwungrad die überschüssige Energie abwechselnd abgeben sowie aufnehmen soll, gilt:

$$E_S = \frac{J}{2} \cdot \left(w_{\max}^2 - w_{\min}^2\right) = J \cdot w_m^2 \cdot d_S \quad \Rightarrow \quad J = \frac{E_S}{w_m^2 \cdot d_S} \quad \textit{Trägheitsmoment.} \tag{6.40}$$

Zusätzlich zur Vergleichmäßigung der Rotationsbewegung ist der Einfluß der ungleich verteilten Massen des Triebwerks zu beachten. Aufgrund der Bewegung aller Massenteile der Maschine kommt es zu einer ständigen Schwerpunktsverschiebung der Maschine. Dieser Umstand erzeugt Erschütterungen, die auf das Fundament und die Befestigung übertragen werden. Soll dies vermieden werden, so muß man für einen ***Massenausgleich*** sorgen, bei dem der Massenschwerpunkt in Ruhe bleibt. Dies erfolgt vorteilhafterweise direkt bei der Auslegung und Konstruktion des Triebwerks. Da dies insbesondere für Einzylinder-Maschinen nur annähernd erreichbar ist, ist für eine entsprechend federnde Verankerung der Maschine zu sorgen.

Abschließend ist noch festzustellen, daß eine Dampfmaschine mit nur einem Kolben einen selbständigen Anlauf nicht garantieren kann, da hier bei Stillstand eine Totpunktposition des Kolbens möglich ist.

In diesem Fall kann kein Drehmoment am Kurbeltrieb wirken. Für einen selbständigen Anlauf der Maschine sind also mindestens zwei um 90° versetzt arbeitende Kolben erforderlich.

6.4 Dampfmaschine mit Heizkreislauf

Aus der Notwendigkeit, die Abwärme der Dampfmaschine in einem Kondensator abzuführen ergibt sich die Überlegung, diesen mit Heizungsanlagen zu verknüpfen. Damit müssen die Erkenntnisse und Strategien, die zur Minimierung des Dampfverbrauchs bei der effektive Erzeugung mechanischer Energie führen, auf eine nunmehr kombinierte Energieversrorgung erweitert werden.

Abgesehen von Heizungsversorgungen bestehen in Industriebetrieben auch andere Einsatzmöglichkeiten sowohl für Dampf als auch für heißes Wasser. Dies gilt zum Beispiel für chemische und pharmazeutische Betriebe, Lebensmittelhersteller, Papier- und Textilproduktion.

Die Kraft-Wärme-Kopplung mit Hilfe einer Dampfmaschine hat je nach Wärmeauskopplung über Dampf oder Wasser einen Einfluß auf den Druck des Abdampfes und somit auf den Anteil an erzeugter mechanischer Energie. Je höher das Temperaturniveau der Wärmeauskopplung gewählt wird, desto höher wird der Abnahme-Dampfdruck p_0 sein, wodurch der mittlere Kolbendruck p_m reduziert wird. Dieser Umstand ist bei der Planung von KWK-Anlagen zu berücksichtigen.

7. Hybridsystem PV + Dampfmaschine mit KWK

Nach einer Aufstellung und Erläuterung der wesentlichen Komponenten wird ein Verfahrensschema zur Realisierung des Hybridsystems vorgestellt. Auf dessen Grundlage wird der experimentelle Aufbau erläutert. Danach folgt eine Analyse der physikalischen Zusammenhänge sowie ein Konzept zur Fahrweise der Anlage. Anschließend wird das zur Abrundung der praktischen Erfahrungen erstellte Simulationsprogramm erläutert.

7.1 Komponenten des Hybridsystems

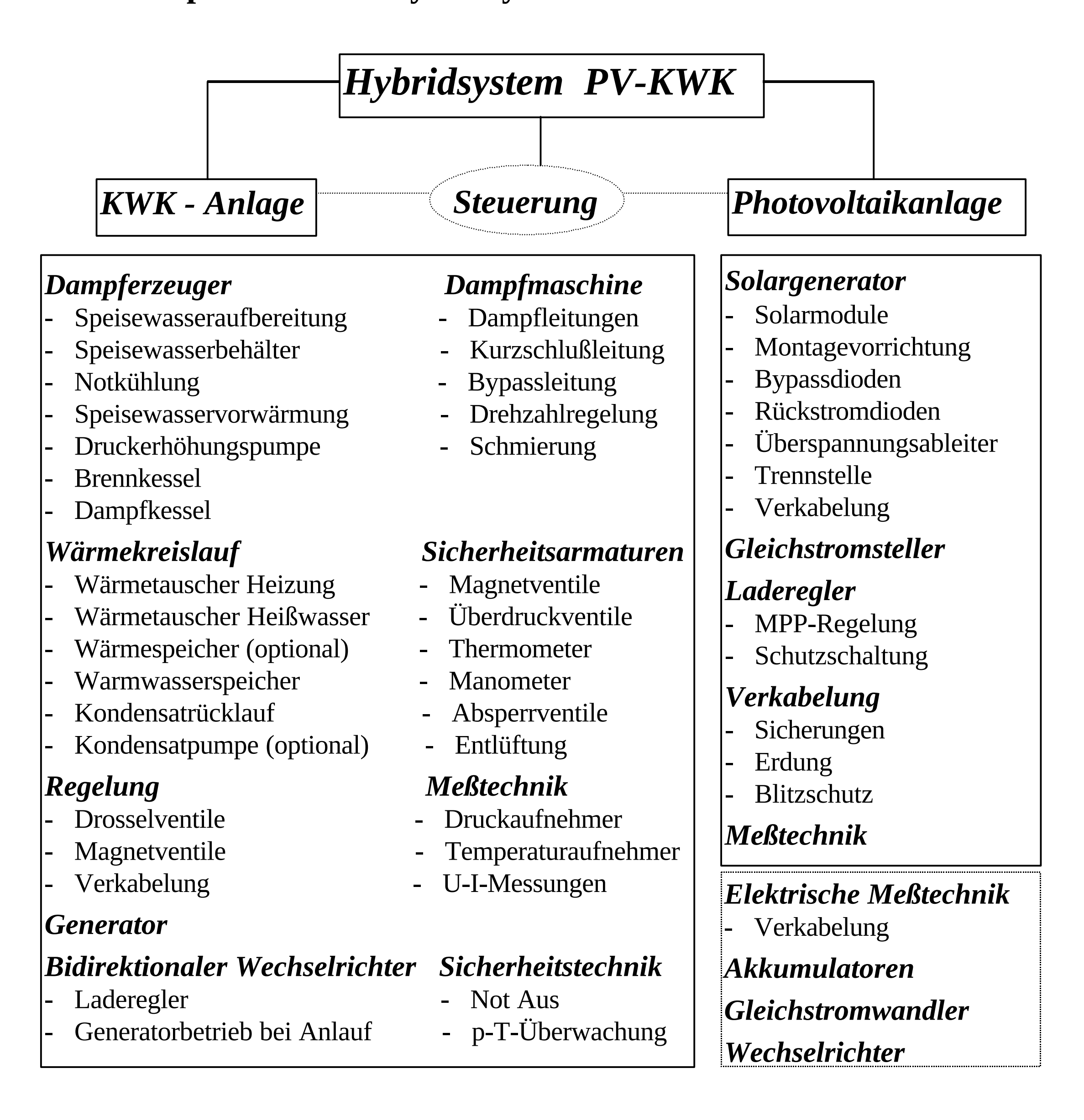


Abb. 7.1 Systemkomponenten für das Hybridsystem

Die erforderlichen Komponenten zum Aufbau des photovoltaischen Hybridsystems mit Dampfmaschine zur Kraft-Wärme-Kopplung können grob in zwei Gruppen aufgeteilt werden, deren gemeinsames Bindeglied die Akkumulatoren darstellen.

Dies ist zum einen die Photovoltaikanlage und zum anderen die KWK-Anlage mit der Dampfmaschine. Der prinzipielle Aufbau von Photovoltaikanlagen, Kraft-Wärme-Kopplungen und photovoltaischen Hybridsystemen wurde bereits in vorangehenden Kapiteln erläutert. Die obige Aufstellung in Abb. 7.1 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Komponenten des autarken Hybridsystems.

Eine Sonderstellung unter den aufgeführten Bestandteilen des Systems kommt dem ***Dampferzeuger*** mit dem dazugehörigen ***Brenner*** zu. Diese Komponente stellt die Schnittstelle zum primären Energieträger Brennstoff dar und bildet die Grundlage für ein hohes Maß an Flexibilität für das Hybridsystem. Nimmt man die Dampferzeugung aus, so besteht die Möglichkeit, eine "***Standardisierung***" für eine derartige Anlagen vorzunehmen, wobei der Dampfanschluß die Schnittstelle darstellt. Mehrere Leistungsabstufungen sind hierbei sicherlich sinnvoll.

Die Ausführung des Brenners muß auf die individuell verfügbaren Brennstoffe abgestimmt sein. Insbesondere der Einsatz von *Biomasse* jeglicher Form ist vorzugsweise zu ermöglichen. Dabei stellen die *festen* Biomassen [7.1] einen hohen Anteil des verfügbaren Potentials.

Es ist auch denkbar, daß sich mehrere nahe beieinander liegende Haushalte einen gemeinsamen Dampferzeuger teilen und über Stichleitungen mit Dampf versorgt werden. Die Energieumwandlung kann dann jeder in Abstimmung mit der PV-Anlage nach seinen eigenen Bedürfnissen regeln. Der individuelle Leistungsbezug kann über den Kondensatrücklauf ermittelt werden, um eine gerechte Lastenverteilung zu ermöglichen. Natürlich ist auch ein gemeinsames Gesamt-Hybridsystem größerer Leistung eine mögliche Variante. Hier sind etliche Modelle vorstellbar.

Selbstverständlich sind bei der Konstruktion und Auswahl des Brenners die gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte einzuhalten.

Das dem Dampferzeuger zugeführte ***Wasser*** ist den Herstellerangaben folgend bis zu einem bestimmten Grad zu enthärten und aufzubereiten [7.2], um eine Verkalkung und Korrosionen zu vermeiden. Hierfür gibt es auf dem Markt eine große Auswahl an Geräten, auch für kleine Wassermengen. Da fortgesetztes Verdampfen und auftretende Wasserverluste trotzt vorheriger Aufbereitung zu einer Aufkonzentration der verbliebenen Ionen führt, ist der Kesselsumpf in regelmäßigen Abständen automatisch zu entschlämmen.

Es ist sinnvoll, einen Wärmetauscher zur ***Speisewasservorwärmung*** in den Dampferzeuger zu integrieren, um überschüssige Wärme aus dem Kondensatrücklauf direkt wieder dem Dampfkessel zuzuführen. Um Wärmeverluste zu vermeiden, sind sämtliche Dampfleitungen und Behälter hinreichend zu isolieren. Bei gut geführtem Prozeß stellt sich dann im ***Speisewasserbehälter*** eine Gleichgewichtstemperatur ein.

Zur Sicherheit sollte ein Wärmetauscherrohr gegen Luft (***Kühlturm***) über dem Speisewasserkessel angebracht sein, welches im Notfall, aufgrund von Fehlfunktionen, gegebenenfalls durchschlagenden Dampf kondensieren kann. Dabei steigt dann die Speisewassertemperatur über den Gleichgewichtswert an. Bei Überschreiten eines definierten Grenzwertes ist dann die Anlage abzuschalten und eine entsprechende Fehlermeldung auszugeben.

Wie bereits berichtet, ist derzeit eine Auswahl von Dampfmaschinen in dem für dieses Hybridsystem angenommenen Leistungsbereich bis 5 kW nicht möglich, da es weltweit keinen Hersteller für solche Dampfmaschinen zu geben scheint. Bevor man also daran denken kann, das hier vorgestellte Hybridsystem für den praktischen Einsatz aufzubauen, ist es zunächst voraussetzend erforderlich, eine "moderne" ***Dampfmaschine*** zu entwickeln. Die Ausführungen der damaligen Maschinen sind für heutige Anwendungen nur bedingt einsetzbar, zumal die heute noch verfügbaren "Sammler-Maschinen" in der Regel schon durch ihre Geschichte gezeichnet sind. Verschleiß und mechanische Schäden sowie Deformationen vermindern die ursprünglich vorhandene Leistungsfähigkeit. Diesen alten Maschinen fehlt auch meist ein Typenschild, dem man Hersteller und Kenndaten wie Dampfzustand, Drehzahl, Leistung u.ä. entnehmen könnte. So kann man fehlende Daten nur anhand der noch verfügbaren damaligen Literatur abschätzen. Dieses Problem kann hier lediglich als Anregung an den modernen Maschinenbau weitergegeben werden. Dieser könnte, die Erkenntnisse des modernen Motorenbaus nutzend, heutzutage sicherlich wesentlich kleinere, kompaktere und leichtere Dampfmaschinen bauen als es früher möglich war. Hilfreich werden dabei ebenfalls auch die heute zur Verfügung stehenden Werkstoffe sein.

Zur direkten Versorgung der Wärmeverbraucher unabhängig vom Einsatz der Dampfmaschine sollte eine ***Bypassleitung*** installiert werden. Diese Leitung kann von der Steuerung zur Deckung des augenblicklichen Strom-Wärme-Verhältnisses je nach Bedarf aktiviert werden (siehe Abb. 7.6).

Ausgleichend kann in diesem Zusammenhang ein ***Wärmespeicher*** wirken, falls es zu zeitlich versetzten Anforderungen von Strom und Wärme kommt. Dies kann auftreten, wenn bei nicht ausreichender Batterieladung eine Stromanforderung ohne eine dementsprechend ausreichende Wärmeabnahme vorliegt. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Speicher für Wärme und Strom aufeinander abzustimmen.

Der ***Heizkreislauf*** und der ***Warmwasserkreislauf*** sowie die Einbindung des Wärmespeichers können nach dem Stand der Technik realisiert werden. Im Unterschied zu Heizkesseln mit Öl oder Gas werden hier die Kreisläufe über ***Dampf-Wärmetauscher*** versorgt, die vom Brenner räumlich getrennt sind.

Während die Temperatur des Warmwasserspeichers als konstanter Sollwert meist selbst gewählt werden kann, ergibt sich die Vorlauftemperatur für den Heizkreislauf in der Regel aufgrund von definierten Heizkurven nach der Außentemperatur [7.3].

Eine mögliche Umschaltung der Heizung auf einen Nachtbetrieb, um Energie zu sparen, bewirkt wiederum ein anderes Temperaturniveau.

Im Unterschied zu den üblichen Heizkesseln empfiehlt sich bei der KWK mit Dampfmaschine der Einsatz von zwei getrennten Wärmetauschern für Heizung und Warmwasser. Diese Wärmetauscher stellen aus der Sicht der Maschine Kondensatoren dar, deren Kondensationstemperatur mit dem dazugehörigen Druck den Wirkungsgrad deutlich beeinflußt (siehe Abb. 6.6). Um den Kondensatordruck vom Gegendruck oder Atmosphärendruck zu entkoppeln, sind im ***Kondensatrücklauf Pumpen*** einzusetzen.

Eine ***Kurzschlußleitung*** sollte vorgesehen werden, um die Leitung zur Maschine freizublasen und aufheizen, damit beim Anfahrvorgang nicht Wasser in den Kolbenzylinder gedrückt wird und die Bewegung behindert.

Die Wahl des ***Generators*** hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu gehört die erreichbare Drehzahl der Dampfmaschine und deren Stabilität, sowie die Frage, ob der Generator auch direkt mit den Verbrauchern verbunden werden soll oder gar Netzeinspeisung stattfinden soll. Bei einer Kolbenmaschine ist mit periodischen Änderungen des Drehmoments zu rechnen, die sich auch auf den Generator übertragen können.

Es kann notwendig sein, den Generator kurzzeitig auch als ***Motor*** zu betreiben, um der Dampfmaschine Anlaufunterstützung zu geben. Bei einer Einkolben-Maschine ist dies unumgänglich. Aus diesen Gründen empfiehlt sich ein Asynchrongenerator mit ***bidirektionalem Wechselrichter*** zur Gleichrichtung im Generatorbetrieb und Rückspeisung mit Wechselrichterfunktion für den Motorbetrieb. Ein weiterer sich daraus ergebender Vorteil ist eine netzfrequenz-ungebundene Wahl der Drehzahl.

Über die Gleichrichtung werden die ***Batterien*** aufgeladen, die sowohl Gleichstromverbraucher als auch über einen ***Wechselrichter*** die Wechselstrom-Verbraucher versorgen können. Dieser Wechselrichter könnte auch zur Netzeinspeisung dienen. Zur ladezustandsgerechten Batterieaufladung ist das System mit einer Laderegelung zu versehen.

Der Batterieanschluß stellt das Bindeglied zwischen der ***Photovoltaikanlage*** und der KWK dar. Über einen ***Laderegler*** mit ***MPP-Tracker*** erfolgt die Stromlieferung der PV-Anlage. Dieser Laderegelung ist durch die Betriebsablaufsteuerung Priorität einzuräumen, damit die Dampfmaschine nicht voreilig die Batterie füllt und damit mehr Brennstoff als nötig eingesetzt wird.

Eine effektive Abstimmung der Stromerzeuger und der Wärmeproduktion erfolgt mit Hilfe einer übergeordneten ***Steuerung***, die das augenblicklich geforderte Strom-Wärme-Verhältnis und die PV-Leistung erfaßt, um die Anlage dementsprechend zu kontrollieren. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende ***Meß- und Regeltechnik***. Das folgende entwickelte Fließschema zeigt die Verknüpfung der Komponenten.

7.2 Verfahrensschema

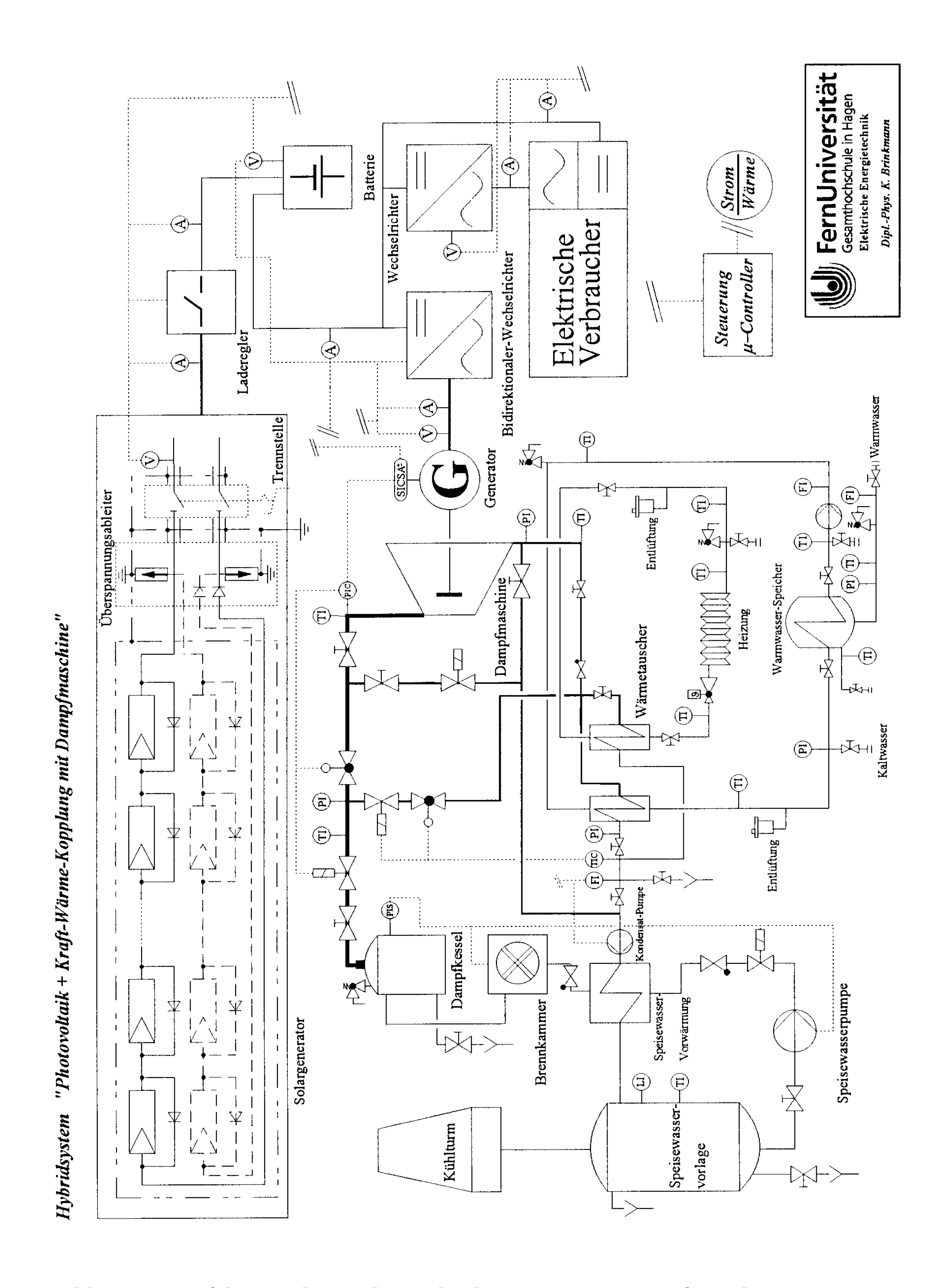


Abb. 7.2 Verfahrensschema des Hybridsystems PV+Dampfmaschine mit KWK

Das obige Verfahrensschema zeigt die funktionale Verbindung der aufgeführten Komponenten des Hybridsystems. Dabei sind Erfahrungen, die sich bei dem experimentellen Aufbau ergeben haben, berücksichtigt worden.

In der obersten Zeile des Schemas ist die Photovoltaikanlage mit der Laderegelung dargestellt, sowie der Batterieanschluß. Darunter kann man drei Bereiche erkennen. Dies ist auf der linken Seite der Dampferzeuger, rechts daneben in der Mitte die Dampfmaschine mit den Heizkreisläufen zur Kraft-Wärme-Kopplung, und abschließend rechts unten die elektrischen Komponenten zur Versorgung der Stromverbraucher sowie die Steuerung. Hierfür empfiehlt sich der Einsatz eines Mikrocontrollers.

Dieses Schema gibt, abgesehen von der sich außerhalb des Gebäudes befindlichen Photovoltaikanlage, den realisierten Laboraufbau wieder. Die Eigenschaften der Photovoltaikanlage können mit Hilfe eines Solargenerator-Simulators auch nachgebildet werden.

Für die Darstellung der KWK sind Sinnbilder nach DIN 2481[240] und Kennbuchstaben für Messen, Steuern und Regeln in der Verfahrenstechnik nach DIN 19227 verwendet worden [7.4]. Eine entsprechende Legende findet sich im Anhang.

Abgesehen von einigen Details bei den Wärmekreisläufen kann dieses Schema als Grundlage für eine Pilotanlage dienen. Zunächst geht es aber nur um die Klärung prinzipieller Eigenschaften und Grundlagen. Der darauf beruhende Versuchsaufbau wurde insbesondere hierfür konzipiert.

7.3 Versuchsaufbau

Entsprechend der Darstellung des Verfahrensschemas ist ein Hybridsystem realisiert worden. In diesem Abschnitt sollen die verwendeten Geräte und Aufbauten beschrieben werden.

Der experimentelle Aufwand zur ***Photovoltaik***-Komponente hat im Hinblick auf die gesetzten Ziele eine eher sekundäre Bedeutung, da hierfür der Stand der Technik als Ausgangsbasis betrachtet wird. Somit liegt das Hauptaugenmerk auf dem Aufbau der Kraft-Wärme-Kopplung mit der Dampfmaschine.

Für die Einbindung der Photovoltaik bestehen im Prinzip zwei Möglichkeiten, entweder die Einbindung der realen PV-Anlage der FernUniverisität oder der Einsatz eines PV-Generator-Simulators. Aufgrund der räumlichen Trennung der PV-Anlage vom Versuchsaufbau wurde auf eine direkte Einbindung dieser Anlage verzichtet. Außerdem würde sich daraus eine Abhängigkeit von der augenblicklichen Wetterlage ergeben, die sich bei dem Einsatzes eines Simulators umgehen läßt. Somit wird der Einsatz eines Solargenerator-Simulators [7.5] mit einer maximalen Ausgangsleistung von 2.5 KW bevorzugt, der einen wetterunabhängigen zeitgerafften Testdurchlauf ermöglicht.

Für die Speicherung der elektrischen Energie sind 4 Panzerplatten-***Batterien*** mit einer Kapazität von je 120 Ah in Reihe geschaltet, so daß die Anschlußspannung 48 V beträgt.

Der ***Dampferzeuger*** wird mit elektrischem Strom betrieben und liefert bis zu 24 kg/h Sattdampf von 6 bar bei 159 °C. Der elektrische Anschlußwert beträgt 18 kW. Diese Apparatur besteht im wesentlichen aus einem 70 Liter großen Speisewasser-Voratsbehälter, einer Druckerhöhungspumpe, einem integrierten Wärmetauscher zur Vorwärmung, dem isolierten Erhitzer zur Dampferzeugung mit 8 Liter Volumen und einer Regelung mittels Druckschalter. Die Funktionsweise dieses Dampferzeugers ist in etwa mit der eines Durchlauferhitzers vergleichbar. Mit Rücksicht auf die Dichtungen der Druckerhöhungspumpe, sollte die Gleichgewichts-Temperatur des Speisewassers 70°C nicht überschreiten [7.6].

Da der Speisewasserbehälter ein offenes Gefäß darstellt, arbeitet das Gesamtsystem gegen den Atmosphärendruck. Der Einlauf des Kondensatrücklaufs befindet sich über dem Wasserspiegel dieses Behälters. Für den Fall, daß der Dampfzustand bis dorthin vordringen sollte, wurde ein 1m langes 3/4"-Kupferrohr als "Kühlturm" senkrecht auf dem Behälter angebracht, um den Dampf zu kondensieren.

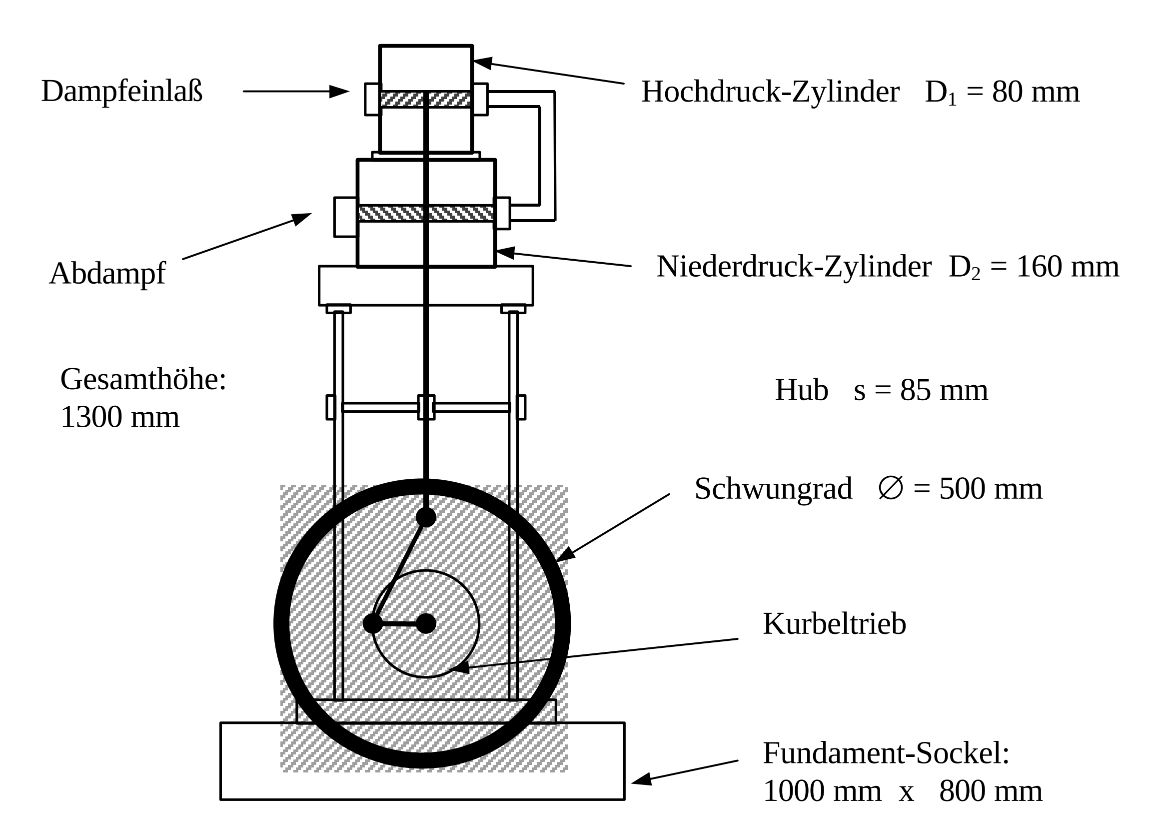


Abb. 7.3 Stehende Tandem-Dampfmaschine des Versuchsaufbaus

Die Dampferzeugung mit Strom ist hier die einfachste und sicherste Lösung für einen Laborbetrieb, zumal die aufgebrachte Leistung meßtechnisch gut erfaßbar ist.

Die Auswahl bzw. Entwicklung eines vorzugsweise mit Biomasse betriebenen Dampferzeugers, der für den zukünftigen realen Einsatz in diesem Hybridsystem geeignet ist, stellt eine noch zu lösende Aufgabe dar. Einen wichtigen Aspekt bei dieser Entwicklungsaufgabe bildet die Teillastfähigkeit, welche eine optimale Anpassung an die Betriebsführung ermöglichen soll, um einen maximalen Gesamtwirkungsgrad anzustreben.

Zur Krafterzeugung sind zwei Dampfmaschinen zum alternativen Betrieb in äquivalenter Weise eingebaut worden. Dies sind eine kleine Modellmaschine, eine "Stuart Model Twin Victoria" [7.7] und eine große original Tandem-Dampfmaschine, die etwa Anfang des Jahrhunderts gebaut wurde, deren Hersteller nicht bekannt ist, wie auch sonst keine Daten mehr darüber verfügbar sind.

Laut Auskunft des vorherigen Besitzers, wurde die Tandem-Maschine wahrscheinlich auf einem Schiff zum Antrieb eines 2,5 kW-Gleichstromgenerators für die Elektrifizierung eingesetzt.

Die Twin Victoria ist eine mit 90° versetzt arbeitenden Kolben versehene Zweizylinder Zwillingsmaschine. Damit hat die Maschine die Fähigkeit, selbst anzulaufen, allerdings nur wenn sich dabei nicht zu viel Kondenswasser in den Zylindern befindet. Diese Maschine eignet sich gut für Vorversuche und für Versuche, die sich auf maschinenbauliche Manipulationen beziehen und dergleichen, da hierbei der handwerkliche Aufwand wesentlich geringer ist als bei der großen Maschine. Erfolgreiche Ergebnisse konnten dann auf die Tandem-Maschine übertragen werden.

Einen erheblichen Aufwand stellte das aufgebaute ***Rohrleitungssystem*** dar. Abgesehen von den Rohren für die Wärmetauscher wurden verzinkte 1/2", 3/4" und 1" handelsübliche Wasserrohre verwendet. Damit ist eine verschraubbare Verlegung möglich, die im Vergleich zu Schweißverbindungen wesentlich praktikabler in Bezug auf Korrekturen ist. Außerdem kann die Verrohrung flexibel an die gewählte Aufstellung angepaßt werden. Da Verbindungen im Laufe der Aufbauphase öfter gelöst werden mußten, wurde zur Abdichtung Teflonband statt Hanf benutzt. Die 1/2" - ***Frischdampfzuleitung*** beginnt am Absperrventil des Dampferzeugers (Abb. 7.2), dem dann zunächst ein Magnetventil folgt, teilt sich in zwei Hauptwege auf, in einen zur Dampfmaschine und einen über ein weiteres Magnetventil direkt zu den Wärmetauschern als ***Bypass*** (siehe auch Abb. 7.6).

Beide Wege sind mit ***Regelventilen*** versehen, um den Dampfstrom gezielt eindrosseln zu können. Ein für diese Maschinen üblicher Fliehkraftregler war nicht mehr vorhanden. So kann zum einen die Drehzahl der Dampfmaschine und zum andern der Wärmefluß geregelt werden. Die mit einem Stellantrieb versehenen Regelventile [7.8] haben eine gleichprozentige Kennlinie und benötigen für den Hub von 20 mm eine Zeit von 45 s.

Gleichprozentige Kennlinien sind für eine Regelung im unteren Durchflußbereich flacher als lineare und ermöglichen deshalb eine bessere Dosierung in diesem Bereich. Im oberen Durchflußbereich dagegen ist die Kennlinie steiler als die lineare, so daß dort der Durchfluß stärker auf eine Hubänderung reagiert. Dieser Umstand ist sowohl günstig für die Bypassleitung im unteren Bereich, als auch für die Drehzahlregleung im oberen Bereich. Die Dampfdosage über den Bypass sollte feinfühlig erfolgen, um eine ruhige Temperaturregelung zu ermöglichen. Im Gegensatz dazu erfolgt die Drehzahlregelung eher im oberen Bereich und sollte rascher reagieren. Dies verdeutlicht die Entscheidung für gleichprozentige Ventilkennlinien [7.9].

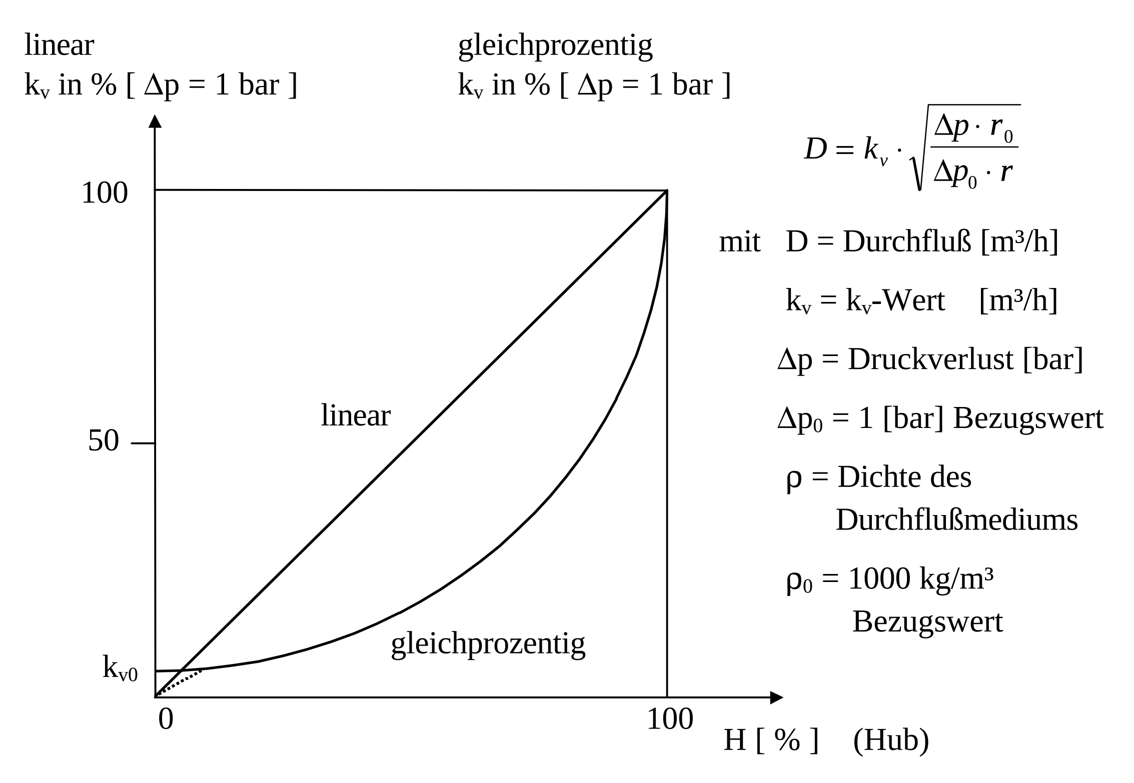


Abb. 7.4 Ventil-Grundkennlinien

Für die durch den Hub des Ventilkegels freigegebene Fläche gilt:

$$A_{lin} = a \cdot H \qquad \text{linerare Kennlinie} \tag{7.1}$$

$$A_{GL} = A_0 \cdot \exp\left(b \cdot \frac{H}{H_{100}}\right) \qquad \text{gleichprozentige Kennlinie} \tag{7.2}$$

a, b = Kennlinien-Neigungsfaktoren.

Der k_{vs}-Wert der eingesetzten Ventile beträgt etwa 0,36 m³/h. Wobei Der k_{vs}-Wert den k_v-Wert einer Bauserie bei Nennhub angibt. Ein geliefertes Ventil darf maximal um ± 10% vom k_{vs} abweichen.

Kurz vor dem Dampfeinlaß in die Dampfmaschine befindet sich eine ***Kurzschlußleitung***, die mit Hilfe eines Magnetventils geöffnet werden kann (Abb. 7.2). Diese Leitung dient zum einen dazu, beim Anfahrprozeß die Rohrleitungen aufzuheizen, um das sich in kalten Rohren bildende Kondensat nicht in die Maschine zu schieben, was den Anlauf behindern würde. Zum anderen kann im Fehlerfall bei Absperrung des Dampferzeugers sofort der Druck in den Leitungen abgebaut werden.
Der Abdampf der Dampfmaschine kann über eine absperrbare Leitung direkt zum Dampferzeuger zurückgeführt werden, damit kurzzeitige Testfahrten und Kontrollen durchgeführt werden können unabhängig von den anderen Komponenten.
Für solche Zwecke ist alternativ auch ein Luftdruckanschluß eingebaut worden, um auch ohne Dampf arbeiten zu können, oder um die Maschine und die Leitungen ausblasen zu können.

Die reguläre 1" ***Abdampfleitung*** wird von der Maschine zu den parallelgeschalteten Wärmetauschern für Heißwasser und die Heizung geführt. Vor dem Eintritt in die beiden Wärmetauscher befindet sich noch die Eintrittsstelle für den bereits beschriebenen 1/2" Bypass.

Die ***Wärmetauscher*** sind selbstgebaut und bestehen aus konzentrisch geführten Kupferrohren ∅ 15 mm und ∅ 22 mm. Ein Rohrwärmetauscherelement ist etwa 1,20 m lang.

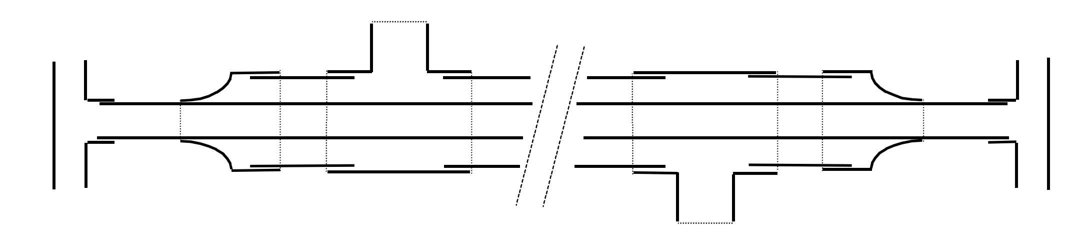


Abb. 7.5 Röhren-Wärmetauscher -Element

Die effektive Austauschlänge beträgt 1m. Der Hauptwärmetauscher des Versuchsaufbaus versorgt den Warmwasserbehälter, weil hier die Möglichkeit besteht, über den Warmwasser-Anschluß gezielt Wärme in der richtigen Größenordnung zu entziehen, wohingegen die Versorgung des Heizkörpers nur des Prinzips wegen und aus Demonstrationsgründen erfolgt. Somit besteht der Warmwasser-Wärmetauscher aus 5 parallel geschalteten Elementen und derjenige für die Heizung nur aus einem.

Diese Austauschflächen haben sich als ausreichend erwiesen, die vom Dampferzeuger lieferbare Wärme abzuführen.

Der ***Warmwasserkreislauf*** besteht aus 3/4"-Rohren, während für die Heizung 1/2"-Rohre benutzt wurden. Beide Kreisläufe sind mit Entlüftungen und Überdruckabsicherungen versehen.

Letztere sind wichtig, da im Falle eines Stopps die Restwärme in den Austauschern noch nachwirkt, so daß sich der Druck in geschlossenen Leitungen aufgrund der Inkompressibilität des Wassers drastisch erhöht und zu Zerstörungen führen kann. Dies gilt insbesondere deshalb, weil hier auf den Einsatz von Ausdehnungsgefäßen, wie sie für reale Heizungsmontagen üblich sind, verzichtet wurde.

Da für den ***Heizkreislauf*** die Konvektionsvorgänge ausreichen, um einen Betrieb zu demonstrieren, wurde im Gegensatz zum Warmwasserkreislauf hier auf eine Kreislaufpumpe verzichtet.

Die im Warmwasserkreislauf eingesetzte Pumpe ist eine handelsübliche Heizungspumpe und fördert in der dritten einstellbaren Stufe etwa 1600 l/h. Dieser Kreislauf versorgt einen 50 l Warmwasserspeicher, der für eine Warmwasser-Dauerleistung von 22 kW konzipiert ist. Dieser Speicher ist mit einem Kaltwasserzulauf und einem Heißwasserabfluß versehen. Selbverständlich sind die Kreisläufe mit Füll- und Entleer-Stutzen versehen.

Das in den Wärmetauschern auf der Dampfseite anfallende Kondensat wird mit Hilfe einer 1/2"-Leitung und über eine wahlweise einschaltbare ***Kondensat-Pumpe*** der Speisewasser-Vorwärmung zugeführt.

Hierbei wurde die gleiche Pumpe eingesetzt wie für den Warmwasserkreislauf. Damit läßt sich der Gegendruck der Dampfmaschine beeinflussen, und verhindern, daß die Dampfmaschine mit Hilfe des Abdampfes die Leitungswiderstände und Höhendifferenzen überwinden muß, was zu Lasten des Wirkungsgrades geht. Der Einbau dieser Pumpe erfolgte an einer tiefer gelegenen Stelle , so daß sie nicht trocken laufen kann, was zur Zerstörung der Stopfbuchsen führen würde.

Die Wärmetauscher, Warmwasserrohre und insbesondere die Dampfleitungen sind mit ***Wärmeisolierungen*** umhüllt. Wichtig ist dabei auch der sich daraus ergebende Berührungsschutz gegen heiße Leitungen.

Beide Dampfmaschinen treiben über Riemen sowie Keilriemen ***Asynchron-generatoren*** an. Die selbstanlaufende Twin Victoria treibt mit einem Übersetzungsverhältnis von 1,8 : 1 einen 3-Phasen-Generator mit Permanentmagnet-Rotor an. Die Nennleistung dieses Generators beträgt 160 Watt.

Für die Tandemmaschine besteht die Notwendigkeit einer Anlaufhilfe, die nach Möglichkeit automatisch erfolgen sollte. Hierfür wurde auf eine bewährte Technik zurückgegriffen, wie sie für den Antrieb von Elektrofahrzeugen eingesetzt wird. Dieses Prinzip bietet sich geradezu in idealer Weise auch für den Einsatz in dem Hybridsystem an. Kernstück dabei ist ein ***Bidirektionaler-Wechselrichter*** [7.10] (3-Phasen). Dieser wandelt zum einen die 48 Volt-Gleichsspannung der Batterien in Wechselspannung für den Motorbetrieb, und zum anderen den im Generatorbetrieb erzeugten Wechselstrom in Gleichstrom. Das Übersetzungs-verhältnis für den Keilriemen-Antrieb des 1,3 kW-Generators beträgt für die große Maschine 3 : 1.

Auf nähere Einzelheiten des Funktionsprinzips wird im Rahmen der Beschreibung des Steuerungskonzepts eingegangen. Auf den Einsatz eines Wechselrichters zur Versorgung elektrischer Verbraucher kann hier im Rahmen der Zielsetzung verzichtet werden, da sich der Verbrauch von elektrischer Energie auch mit Hilfe ohmscher Widerstände direkt mit Gleichstrom realisieren läßt.

Die ***Meßtechnik*** der Anlage ist entsprechend des Verfahrensschemas ausgeführt und wird im Rahmen des Regelungs- und Steuerungskonzepts eingehender behandelt. Bei der Verkabelung wurden, wie es in verfahrenstechnischen Anlagen üblich ist, aus Sicherheitsgründen Kabelschutzrohre eingesetzt.

7.4 Physikalische Modellierung

Der Übersichtlichkeit halber wird für die folgende Analyse der physikalisch mathematischen Gesetzmäßigkeiten des Systems nur das Kernstück der Kraft-Wärme-Kopplung betrachtet.

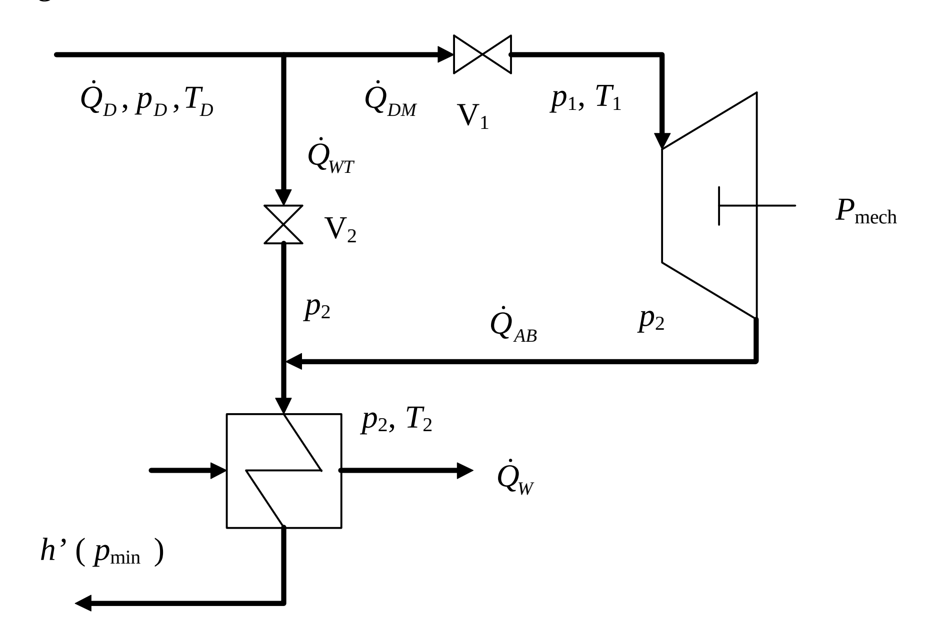


Abb. 7.6 Prinzipdarstellung der Hauptfunktionen der KWK-Anlage

Der Frischdampf-Energiefluß $\dot{Q}_D$, der vom Dampferzeuger geliefert wird, teilt sich über die Drosselventile V_1 und V_2 zwei Teilströme auf, zur Dampfmaschine $\dot{Q}_{DM}$ sowie zum direkt zum Wärmetauscher $\dot{Q}_W$. Als Bezugsniveau gilt die Enthalpie des Kondensats $h'(p_{min})$, so daß bei idealer Prozeßführung, von der im folgenden ausgegangen werden soll, der Wert von $\dot{Q}_D$ die eingangs aufzubringende Gesamtleistung darstellt. Den realen Bedingungen kann im Nachhinein durch Gütefaktoren Rechnung getragen werden.

Auf diese Weise bleiben die Vorgänge transparent, und die einzelnen realen Verlust-Effekte können leichter separat zugeordnet werden, da diese meist auch auf praktischen Erfahrungswerten basieren. Unter diesen Voraussetzungen kann eine einfache Energiebilanz aufgestellt werden. Es gilt daher:

$$\dot{Q}_D = \dot{Q}_{DM} + \dot{Q}_{WT} = P_{mech} + \dot{Q}_W \,. \tag{7.3}$$

Nachdem ein Teil des Energieflusses zur Dampfmaschine in mechanische Energie umgesetzt wurde, verläßt ein Abwärmestrom $\dot{Q}_{AB}$ die Maschine und vereinigt sich mit $\dot{Q}_{WT}$ zur Abgabe der Wärmeleistung $\dot{Q}_W$.

$$\dot{Q}_{WT} = \dot{Q}_W - \dot{Q}_{AB} \tag{7.4}$$

Für den Wirkungsgrad h und die Kennziffer der mechanischen Energie t gilt:

$$h = \frac{P_{mech}}{\dot{Q}_{DM}} = \frac{P_{mech}}{P_{mech} + \dot{Q}_{AB}} \quad , \quad t \equiv \frac{P_{mech}}{\dot{Q}_W} \,. \tag{7.5}$$

Um einen sinnvollen Betrieb der KWK-Anlage zu garantieren, sollte bei der Auslegung und Betriebsführung darauf geachtet werden, daß keine überschüssige Wärme erzeugt wird. Dies setzt voraus, daß der Abwärmestrom aus der Dampfmaschine nicht größer ist, als der vom Verbraucher angeforderte Wärmestrom werden kann. Maximal dürften beide Wärmeströme den gleichen Wert besitzen. Dann wäre der durch den Bypass zugeführte Wärmestrom gleich Null. Damit ergibt sich für den '**erlaubten Betriebsbereich**' die mathematische Bedingung:

$$\dot{Q}_{WT} \geq 0 \quad \Leftrightarrow \quad \dot{Q}_W - \frac{1-h}{h} \cdot P_{mech} \geq 0 \,. \tag{7.6}$$

Damit kann die folgende Bedingung aufgestellt werden:

$$\boxed{h \geq \frac{t}{1+t} \quad \text{bzw.} \quad t \leq \frac{h}{1-h}} \,. \tag{7.7}$$

Diese rein thermodynamische Bedingung soll nun mit Maschinen-Parametern korreliert werden. Hierfür müssen zunächst die Zusammenhänge zwischen den thermodynamischen Größen und der Drehzahl der Maschine aufgezeigt werden. Für den Wärmestrom zur Dampfmaschine gilt nach der Drosselung durch das Ventil V_1:

$$\dot{\ }_{DM} = m_{DM} \cdot h\left(\ _1, T_1\right) \qquad _{DM}\left(p\ ,\ _1\right) \cdot \dot{V}_{DM}\left(p_1 \qquad \right) \tag{7.8}$$

mit $\quad _{DM}\left(p_1, T_1\right)$

$\dot{V}_{DM}\left(p_1, T_1\right)$ Volumenstrom [m³/h].

Bei jeder Umdrehung des Kurbeltriebs der Dampfmaschine wird der Zylinder zwei V_F gefüllt (Abb.6.7). Dies ist das durch die Schieberventile mechanisch festgelegte "Einlaßvolumen", das in Folge expandieren kann. Damit erhält

$$\dot{V}_{DM} = \frac{w}{2p} \cdot 2 \cdot V_F = \frac{w \cdot V_F}{p} \quad . \tag{7.9}$$

Idealisierend wird hier und im folgenden angenommen, daß das Volumen V_F unabhängig von Druck und Drehzahl voll genutzt wird und somit der tatsächlich erfolgenden Füllung entspricht. Für die Winkelgeschwindigkeit gilt dann:

$$w = \frac{\dot{m}_{DM} \cdot p}{V_F \cdot r_{DM}} . \tag{7.10}$$

Die mechanische Leistung der Dampfmaschine (Abb. 6.2) erhält man mit:

$$P_{mech} = \dot{m}_{DM} \cdot \left(h_3 - h_4 \right) . \tag{7.11}$$

Bei der Ventildrosselung bleibt die Enthalpie h_3 erhalten (Energieerhaltung !), so daß

$$h_3\left(p_D , T_D \right) = h_3\left(p_1 , T_1 \right) . \tag{7.12}$$

Durch die Drosselung und die damit verbundenen Druck- und Temperaturänderungen erhält man eine Entropiezunahme, also einen neuen Wert für die Entropie s_3, die beim idealen Dampfkraftprozeß während der Expansion konstant bleibt. Dadurch ändert sich auch h_4 und somit auch der Wirkungsgrad:

$$h = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1} \quad \text{mit} \quad h_4 = h'\left(p_{\min} \right) + T_{\min} \cdot \left[s_3 - s'\left(p_{\min} \right) \right] . \tag{7.13}$$

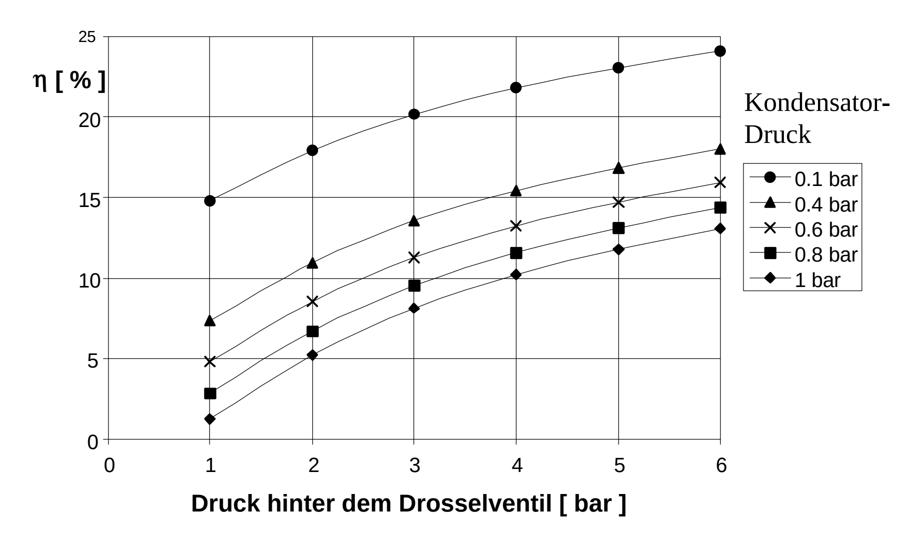


Abb. 7.7 Einfluß der Drosselung auf den idealen Wirkungsgrad

Eliminiert man $\dot{m}_{DM}$ aus den obigen Gleichungen, so erhält man letztlich für die Drehzahl folgenden Zusammenhang:

$$n\left[\min^{-1}\right] = \frac{30 \cdot P_{mech}}{V_F \cdot r_{DM} \cdot \left(h_3 - h'\left(p_{\min}\right) - T_{\min} \cdot \left[s_3 - s'\left(p_{\min}\right)\right]\right)} = \frac{30 \cdot P_{mech}}{V_F \cdot r_{DM} \cdot \left(h_3 - h_4\right)} . \quad (7.14)$$

Um eine von der Maschinenbauart unabhängige Gleichung zur Verfügung zu haben, ist es sinnvoll, die mechanische Leistung auf das Füllvolumen zu beziehen:

$$n\left[\min^{-1}\right] = \frac{30 \cdot X}{r_{DM} \cdot \left(h_3 - h_4\right)} \quad \text{mit} \quad X \equiv \frac{P_{mech}}{V_F} . \quad (7.15)$$

Mit Hilfe des Wirkungsgrades läßt sich die 'Betriebsbedingung' (7.7) wie folgt erweitern:

$$h = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1} \geq \frac{t}{1+t} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{h_3 - h_4} \leq \frac{1+t}{t} \cdot \frac{1}{h_3 - h_1} \quad \Rightarrow$$

$$n\left[\min^{-1}\right] \leq \frac{30 \cdot X}{r_{DM} \cdot \left(h_3 - h_1\right)} \cdot \frac{1+t}{t} . \quad (7.16)$$

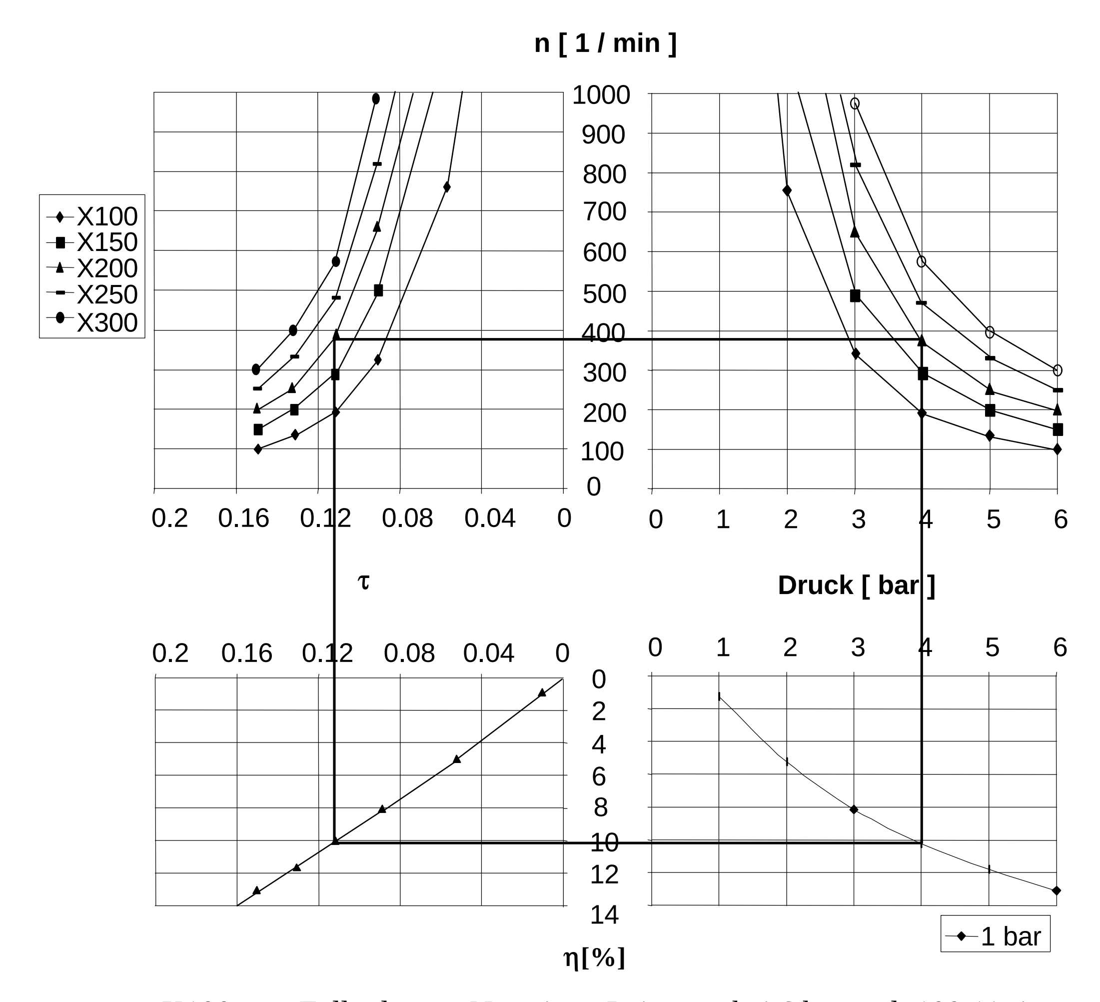
Daraus läßt sich eine ***grundlegende Formel*** gewinnen, welche das von der KWK-Anlage erfüllbare Strom-Wärme-Verhältnis s_{KWK} in Abhängigkeit vom Dampfzustand und von Maschinenparametern angibt:

$$s_{KWK} \leq h_{Strom} \cdot \left[n \cdot \frac{r_{DM} \cdot \left(h_3 - h_1\right)}{30 \cdot X} - 1 \right]^{-1} \quad (7.17)$$

$$\text{mit} \qquad h_{Strom} \equiv \prod_i h_i .$$

Dabei berücksichtigt der Wirkungsgrad h_{Strom} die Verluste der einzelnen Komponenten zur Umwandlung der mechanischen Energie (h_i) in verfügbaren Verbraucher-Strom. Das von der KWK-Anlage zu erfüllende Strom-Wärme-Verhältnis s_{KWK} ergibt sich bei dem Hybridsystem aus der benötigten Wärme und dem Stromverbrauch abzüglich der Stromerzeugung durch die PV-Anlage.

Zusammenfassend kann aus den obigen Bedingungen ein Diagramm zur Bestimmung von möglichen Betriebspunkten gewonnen werden. Das folgende Diagramm zeigt als Beispiel ein Diagramm für 6 bar Sattdampf und einem Kondensatordruck von 1 bar.



X100 ≡ Füllvolumen-Normierte Leistung bei 6 bar und 100 1/min

Abb. 7.8 Diagramm zur Bestimmung von Arbeitspunkten bei 6 bar Sattdampf

Dabei wurde X als Parameter benutzt. So bedeutet X200, die normierte mechanische Leistung bei 6 bar Sattdampf für eine Drehzahl von 200 1/min. Bei der Drosselung wird dann dieser Wert als konstanter Parameter beibehalten, also die Leistung nicht geändert. Soll die gleiche Leistung bei eingedrosselten 4 bar beibehalten werden, so muß die Drehzahl 382 1/min betragen, bei einem Wirkungsgrad von etwa 10% für zulässige $t \le 0.11$.

Für die Praxis können diese theoretischen Werte als Anhaltspunkte dienen, die sowohl für die Konstruktion als auch für eine Inbetriebnahme eine wertvolle Hilfe darstellen.

Eine detailliertere Zerlegung des Hybridsystems in seine Komponeten und dessen physikalisch mathematische Beschreibung erfolgt im Rahmen der Erläuterungen zum entwickelten Simulationsprogramm.

7.5 Regelungskonzept

Die Hauptregelstrecken des Hybridsystems bilden die Drehzahlregelung der Dampfmaschine und die Regelung der Wärmezufuhr zum Kondensator, sowie die Laderegelung der Batterie. So wie die Regelung der Drehzahl und der Wärmezufuhr systemtechnisch miteinander verknüpft sind, ist die Laderegelung sowohl auf die PV-Anlage als auch auf die Stromerzeugung durch den Generator abzustimmen.

Sowohl die Strategie der Laderegelung als auch die der MPP-Regelung wurden bereits im Kapitel Photovoltaik ausreichend behandelt, zumal hier auf den Stand der Technik zurückgegriffen werden kann. Die Abstimmung der einzelnen zum Teil verschachtelten Regelkreise erfolgt durch die Steuerung. Darauf wird im Abschnitt "Steuerungskonzept" eingegangen.

Die folgenden Ausführungen zeigen eine Analyse der physikalischen Zusammenhänge der KWK-Anlage in Bezug auf die Realisierung des erarbeiteten Regelungskonzepts.

Um erfolgreich eine Regelstrecke implementieren zu können, ist es wichtig, das Verhalten des betroffenen Teilsystems in bezug auf sein Verhalten bei Änderung der verantwortlichen Parameter zu kennen [7.11]. Für die Einflußnahme auf die KWK sind im wesentlichen die beiden Regelventile zur Drosselung des Dampfstroms zur Maschine und im Bypass zum Kondensator die entscheidenden Elemente.

Durch Veränderung des Ventilhubs wird der Dampfzustand und der Durchfluß verändert, was zu entsprechenden Reaktionen im System führt. Es gilt also zu zeigen, wie diese Reaktionen aussehen und wie stark die sich ergebenden Änderungen sind.

Zunächst wird das ***Drehzahlverhalten*** in Abhängigkeit von der Drosselung und der mechanischen Leistung untersucht.

Die folgende Abbildung 7.9 zeigt das Verhalten der Drehzahl bei variablem Kondensatordruck und die erforderliche Drosselung, um die normierte Leistung X100 zu halten. Bei einem Sattdampf von 6 bar gilt X100 = 3227,5 kJ/m³min.

Bei konstant zu erfüllender mechanischer Leistung ist bei eingedrosselten Dampfzuständen die Drehzahl zu erhöhen, da zum einen die Dichte des Dampfes in etwa proportional zum Druck abnimmt und zum anderen die Differenz $(h_3 - h_4)$ kleiner wird. Somit sinkt einerseits die Arbeitsfähigkeit des Dampfes und gleichzeitig wird je Hub weniger Masse in das Füllvolumen eingelassen.

Da die Regelung der Wärmekreisläufe mit dem Kondensatrücklauf verknüpft ist, wird die Kondensatortemperatur je nach den gewünschten Vorlauftemperaturen schwanken.

Diese Temperaturschankungen erzeugen eine Drehzahländerung aufgrund der damit verbundenen Wirkungsgradänderung. Soll die Anlage bei konstanter Drehzahl betrieben werden, so kann hier das Korrekturverhalten mit Hilfe der Drosselung abgeschätzt werden

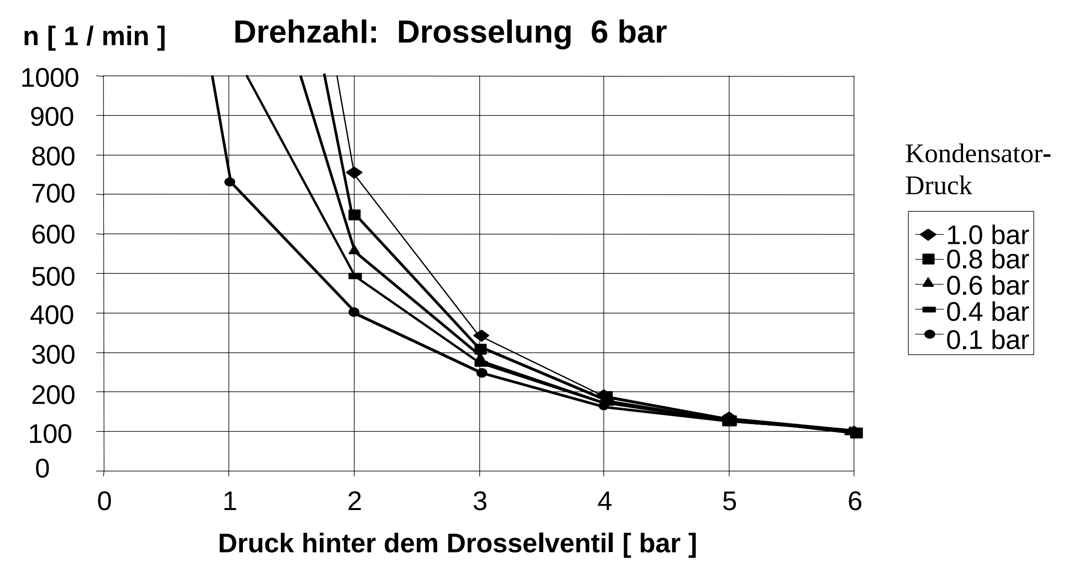


Abb. 7.9 Einfluß der Drosselung auf die Drehzahl bei X100

Um die relative Drehzahländerung bei Drosselung zu bestimmen, zum Beispiel von einer Drehzahl n_0 bei 6 bar auf $n_1 < n_0$, betrachte

$$n_0 = \frac{30 \cdot X_0}{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0} \quad \text{und} \quad n_1 = \frac{30 \cdot X_1}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \quad \Rightarrow$$

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \cdot \frac{X_1}{X_0}. \tag{7.18}$$

Daraus kann eine Aussage über die sich ergebenden relativen Änderungen gewonnen werden:

$$1 - \frac{n_1}{n_0} = 1 - \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \cdot \frac{X_1}{X_0}$$

und mit $\Delta n = n_0 - n_1$ sowie $\Delta X = X_0 - X_1$ ergibt sich

$$\boxed{\frac{\Delta n}{n_0} = \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1}\left(\frac{\Delta X}{X_0}\right) - \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} + 1} \tag{7.19}$$

Man erhält also eine Geradengleichung der Form y = ax + b bezüglich der relativen Drehzahländerung in Abhängigkeit von der relativen Leistungsänderung.

Für *DX = 0* , also bei konstanter Leistung gilt:

$$\frac{\Delta n}{n_0} = 1 - \frac{(h_3 - h_4)_0 \cdot r_0}{(h_3 - h_4)_1 \cdot r_1} \tag{7.20}$$

Der Zustand 1 ergibt sich hier aus Zustand 0 durch Betätigen des Drosselventils.

p [bar]	6	5	4	3	2
$\frac{\Delta n}{n_0}$ [%]	0	-32,4	-90,6	-227,5	-644,7

Tabelle 7.1 Relative Drehzahländerung X=const. und 1 bar Kondensatordruck

Läuft die Maschine hingegen bei konstantem Dampfzustand, so vereinfacht sich die Beziehung zwischen der relativen Drehzahländerung und der relativen Leistungsänderung zur Äquivalenz und damit:

$$\Delta n = \frac{n_0}{X_0} \cdot \Delta X = \frac{n_0}{P_{mech,0}} \cdot \Delta P_{mech} \quad . \tag{7.21}$$

Soll dabei die Drehzahl konstant bleiben, so ist mit Hilfe der Drosselung eine Korrektur über den Dampfzustand erforderlich.

Mit der Beziehung $P = M \cdot w$ und $P = \dot{m}_{DM} \cdot \left(h_3 - h_4\right)$ kann in analoger Weise eine Gleichung zur relativen Drehmomentänderung hergeleitet werden:

$$\frac{\Delta M}{M_0} = 1 - \frac{r_1 \cdot \left(h_3 - h_4^1\right)}{r_0 \cdot \left(h_3 - h_4^0\right)} \quad . \tag{7.22}$$

Bei einer Drosselung von 6 auf 5 bar bei 1bar Kondensatordruck würde sich das Drehmoment um 24,8 % reduzieren.

In der Praxis wird die Drehbewegung des Schwungrades über einen Riemen auf den Generator übertragen. Dort befindet sich ein Tachogenerator zur Aufnahme des Istwertes. Dieser wird im Regler mit dem Sollwert w verglichen, und daraufhin wird die Stellgröße y der sich ergebenden Regelabweichung $e = \left(w - x\right)$ angepasst. Diese Stellgröße, hier in der Form eines 4-20 mA-Signals, wird dem Stellmotor des Drosselventils übermittelt, der die dazugehörige Hubänderung vornimmt.

Das Lastmoment (Verbraucher) wirkt dem Antriebsmoment entgegen und bewirkt, daß sich die Last wie ein proportionales Übertragungsglied mit Verzögerung erster Ordnung (PT1, VZ1) verhält. Alle Störmomente, die von außen auf das System einwirken, seien zu dem Störmoment M_Z zusammengefaßt. Für die Drehzahlregelung können Regler mit P-, PI- oder PID-Verhalten verwendet werden. Welcher davon der geeignetste, ist hängt von der Systemdynamik ab. Die experimentell realisierte Anlage ist aufgrund der Massenträgheit der verfügbaren Maschine und der dafür erforderlichen Rohrleitungslängen relativ träge, so daß ein D-Anteil sicherlich Vorteile bringt. Das Regelverhalten dieses speziellen Aufbaus ist aber sicher nicht allzu repräsentativ für andere Aufbauten, zudem ist dabei eine ausreichende Reproduzierbarkeit nur schwer erreichbar.

Prinzipiell gibt der folgende Signalflußplan die Verhältnisse näherungsweise wieder, in allgemeiner Anlehnung an Motoren:

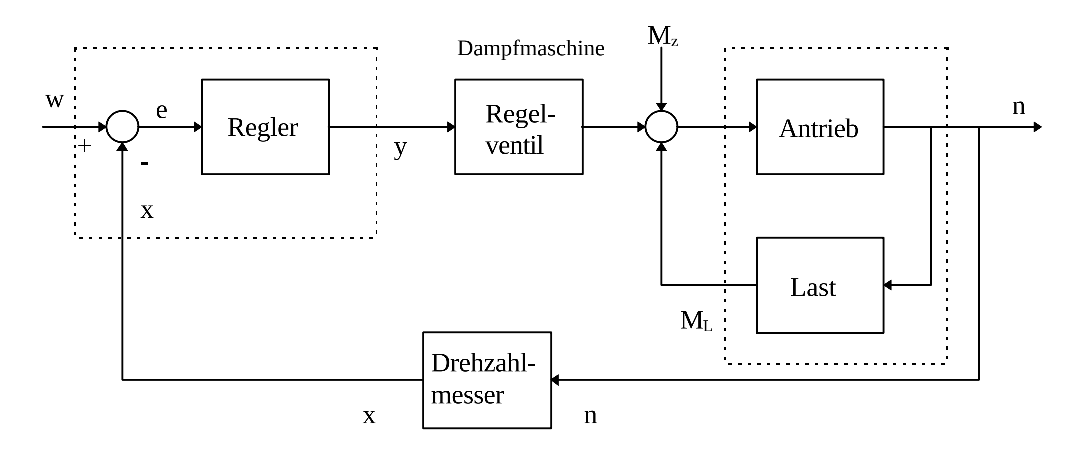


Abb. 7.10. Signalflußplan der Drehzahlregelung

Etwas komplexer als die Drehzahlregelung stellt sich Aufgabe der Regelung der Wärmemengen dar, die über die Wärmetauscher zu den Verbrauchern gelangen sollen. Hierbei handelt es sich um Kaskadenregelungen.

Die einzustellende ***Wärmeleistung*** richtet sich nach den Verbraucheranforderungen, sowohl bezüglich der Wärme als auch des Stromes, da die erzeugte mechanische Leistung den Abwärmestrom aus der Maschine bestimmt. Diesen Zusammenhang kann man recht gut über eine Betrachtung bei Wirkungsgradänderung verdeutlichen.

Betrachtet man die Energiebilanz $\dot{Q}_{WT} = \dot{Q}_W - \dot{Q}_{AB}$ bei konstanter Wärmeabnahme aber bei unterschiedlichen Wirkungsgraden, kann eine Beziehung zwischen der relativen Wirkungsgradänderung und der Wärmeleistungsänderung durch den Bypass gewonnen werden. Die Bypassleistung wird dabei auf die mechanische Leistung bezogen.

Somit erhält man folgende Formel:

$$\frac{\Delta\dot{Q}_{WT}}{P_{mech}} = \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_0}\right) = \frac{\Delta h}{h_0}\left(\frac{1}{h_0}\cdot\frac{1}{1+\dfrac{\Delta h}{h_0}}\right) \qquad (7.23)$$

und weiter mit $t = \dfrac{P_{mech}}{\dot{Q}_W} \Rightarrow$

$$t = \frac{\Delta\dot{Q}_{WT}}{\dot{Q}_W}\left\{\frac{\Delta h}{h_0}\left(\frac{1}{h_0}\cdot\frac{1}{1+\dfrac{\Delta h}{h_0}}\right)\right\}^{-1} = \frac{P_{mech}}{\dot{Q}_W}\,. \qquad (7.24)$$

Damit ist ein Ausdruck gewonnen, der einen direkten Zusammenhang zwischen der ***Zielgröße*** t und der erforderlichen Regelung der Zusatzwärmeleistung $\dot{Q}_{WT}$ und der Wirkungsgradänderung aufzeigt. Die Wirkungsgradänderung ergibt sich durch die Drehzahlregelung. Dies verdeutlicht noch einmal die Verquickung dieser Regelstrecken.

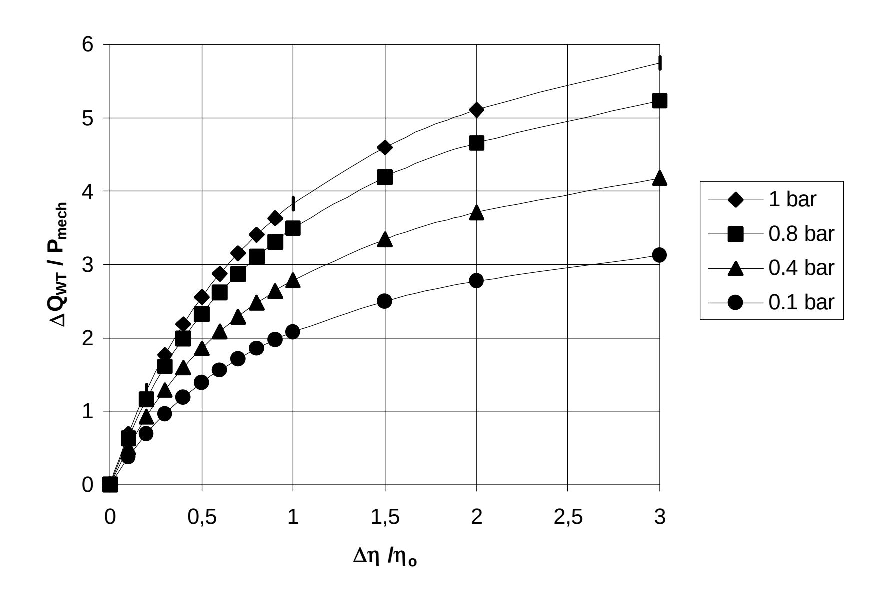


Abb. 7.11 Einfluß der Wirkungsgradänderung auf die Bypassregelung

Im folgenden soll der Einfluß der Bypass-Regelung auf die Kondensat-Rücklauf-Temperatur herausgearbeitet werden. Der Gesamtmassestrom teilt sich in den Massestrom zur Dampfmaschine und in den zum Wärmetauscher auf:

$$\dot{m}_D = \dot{m}_{DM} + \dot{m}_{WT} \tag{7.25}$$

Die Gesamtenergie berechnet sich aus $\dot{Q}_D = \dot{m}_D \cdot (h_3 - h_1)$. Die Enthalpie h_1 wird durch die Rücklauftemperatur festgelegt:

$$T_{\min} \rightarrow h_1$$

Wünscht man eine bestimmte temporäre Leistungs- ($P_{mech} = const.$) und Wärmeanforderung ($\dot{Q}_W = const.$) und geht von einer Abweichung des Ist-Wertes vom Soll-Wert aus, ergibt sich:

$$\dot{m}_D(Ist) \neq \dot{m}_D(Soll) \Rightarrow \Delta\dot{m}_D = \dot{m}_D(Soll) - \dot{m}_D(Ist) \quad \Rightarrow$$

$$\Delta\dot{m}_D \Rightarrow \Delta h = (h_1(Soll) - h_1(Ist)) \tag{7.26}$$

Als Energiebilanz erhält man: $\dot{m}_D \cdot h_1 = \dot{m}_D \cdot h_3 - P_{mech} - \dot{Q}_W \quad \Rightarrow$

$$h_1(Soll) = h_3 - \frac{P_{mech} + \dot{Q}_W}{\dot{m}_D} = h_3 - \frac{P_{mech} + \dot{Q}_W}{\dot{m}_{DM} + \dot{m}_{WT}} \tag{7.27}$$

Weicht der Ist-Zustand geringfügig vom Soll-Zustand ab, so gilt:

$$\dot{m}_{WT} \rightarrow \dot{m}_{WT} \pm \Delta\dot{m}_{WT}$$

Damit ergibt sich für den Ist-Zustand

$$h_1(Ist) = h_3 - \frac{P_{mech} + \dot{Q}_W}{\dot{m}_D \pm \Delta\dot{m}_{WT}}\,. \tag{7.28}$$

Die Differenz zwischen Soll- und Ist-Zustand berechnet sich zu

$$h_1(Soll) - h_1(Ist) = (P_{mech} + \dot{Q}_W) \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_D \pm \Delta\dot{m}_{WT}} - \frac{1}{\dot{m}_D} \right) \quad \Rightarrow$$

$$h_1(Soll) - h_1(Ist) = \frac{(P_{mech} + \dot{Q}_W)}{\dot{m}_D} \cdot \left(-1 + \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta\dot{m}_{WT}}{\dot{m}_D}} \right)\,. \tag{7.29}$$

Mit der Näherung $\frac{1}{1 \pm x} \approx 1 \mp x$ für $x << 1$ kann man vereinfachend abschätzen:

$$\Delta h = \frac{(P_{mech} + \dot{Q}_W)}{\dot{m}_D} \cdot \left(-1 + 1 \mp \frac{\Delta \dot{m}_{WT}}{\dot{m}_D} \right) \approx \mp \frac{\left(P_{mech} + \dot{Q}_W\right)}{\dot{m}_D} \cdot \left(\frac{\Delta \dot{m}_{WT}}{\dot{m}_D} \right). \tag{7.30}$$

Kann diese Energieänderung in einem Dampfwärmetauscher nicht den geforderten Wärmebedarf erfüllen, so führt diese Differenz zu einer Änderung der Kondensat-Rücklauf-Temperatur. Für diese kann über die spezifische Wärmekapazität bei näherungsweise konstantem Druck ein Zusammenhang mit der Gesamtenergie, sowie der Wärmeanforderung des Verbrauchers aufgestellt werden:

$$\dot{m}_D \cdot \Delta h \cong \dot{m}_D \cdot \bar{c}_p \cdot (\Delta T) \cong \Delta \dot{Q}_W \quad \Rightarrow$$

$$\dot{m}_D \cdot \Delta h = \dot{m}_D \cdot \bar{c}_p \cdot \Delta T = \mp \frac{(P_{mech} + \dot{Q}_W)}{\dot{m}_D} \cdot \Delta \dot{m}_{WT} \quad \Rightarrow$$

$$\Delta T = \mp \frac{P_{mech} + \dot{Q}_W}{\dot{m}_D^2 \cdot \bar{c}_p} \cdot \Delta \dot{m}_{WT} = \mp \Lambda \cdot \Delta \dot{m}_{WT} \quad \text{mit} \quad \Lambda = \frac{P_{mech} + \dot{Q}_W}{\dot{m}_D^2 \cdot \bar{c}_p}. \tag{7.31}$$

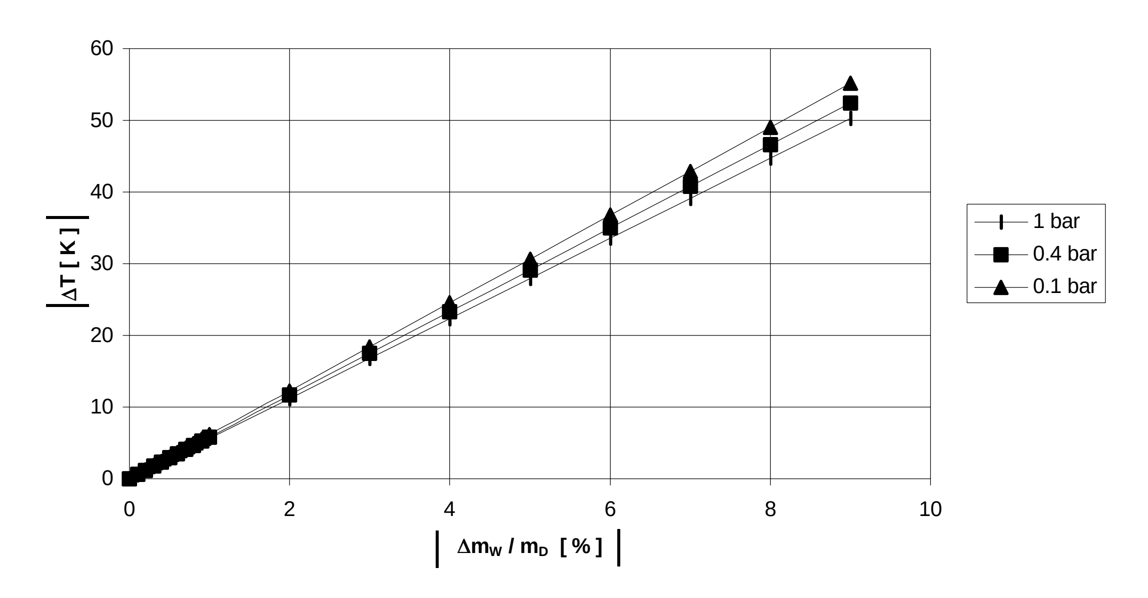


Abb. 7.12. Einfluß auf die Kondensat-Rücklauf-Temperatur

Man erkennt, daß der Einfluß des Kondensator-Drucks relativ gering ist, da der Unterschied hier auf die Variation von h_1 zurückzuführen ist, die relativ gering ist. Einer Temperaturänderung von $|\Delta T| = 1K$ entspricht einer Durchflußänderung im Bypass von $|\Delta \dot{m}_{WT} / \dot{m}_D| \approx 0{,}18\%$.

Für die Gesamtenergie gilt: $P_{mech} + \dot{Q}_W = \dot{m}_D \cdot (h_3 - h_1)$ und damit gilt letztendlich

$$\Lambda = \frac{h_3 - h_1}{\dot{m}_D \cdot \bar{c}_p} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta T \cong \mp \frac{h_3 - h_1}{\bar{c}_p} \cdot \frac{\Delta \dot{m}_{WT}}{\dot{m}_D}} \; . \tag{7.32}$$

Als Resultat ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Veränderung des zu regelnden Massenstrom im Bypass und der Temperaturänderung im Wärmekreislauf.

Diese abgeschätzten Proportionalbereiche stellen entsprechende Anforderungen an das einzusetzende Regelventil, wobei hier auf den dazugehörigen Volumenstrom umzurechnen ist.

Diese Abschätzung soll ein Gefühl für die gegenseitigen Empfindlichkeiten vermitteln. Eine Temperaturerhöhung im Kondensator erhöht gleichzeitig den Kondensatordruck, der einen starken Einfluß auf den Wirkungsgrad hat. Somit kommt es zu einer iterativen Rückkopplungskette. Aber die Unsicherheiten dieser Abschätzung werden umso kleiner, je geringer die Schwankungen gehalten werden.

Aus diesem Grund scheint es von Vorteil zu sein, das System über die Kondensatrücklauf-Temperatur zu kontrollieren und diese in gewissen Grenzen zu regeln. Dieser Temperatur kommt sozusagen sowohl thermodynamisch als auch verfahrenstechnisch eine Schlüsselrolle zu, weshalb der Hauptregelkreis für die konzipierte Wärmebedarfs-Regelung sich auf diese Führungsgröße stützt.

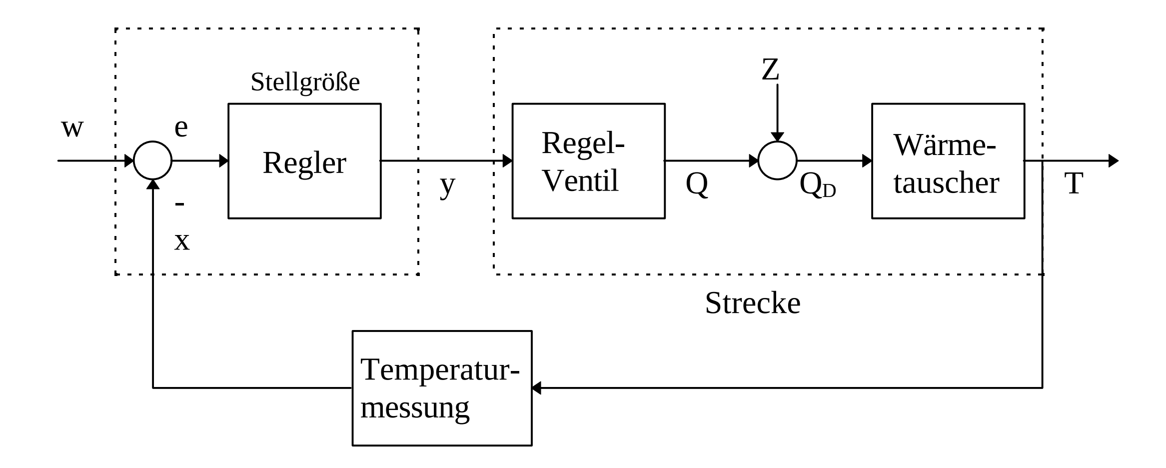


Abb. 7.13. Strukturbild der Kondensat-Temperaturregelung

Im Versuchsaufbau erfolgen die Temperaturmessungen über PT100-Module, die ein entsprechendes 4-20 mA-Signal zur Verfügung stellen [7.12]. Dieser Istwert x wird mit dem Sollwert w verglichen und der Differenz e eine Stellgröße y als Ausgang zugeordnet.

Standardmäßig sind im praktischen Aufbau fast alle Meßsignale als 4-20 mA Stromsignale ausgeführt. Bei der Kondensatrücklauf-Temperatur-Regelung wird das Stellventil im Bypass angesteuert (V2 in Abb 7.6), um eine korrigierende Ventil-Hubänderung einzuleiten.

Für Temperaturregelungen sind in der Regel PI-Regler ausreichend. Häufig gibt man sich auch mit 2-Punkt-Regelungen zufrieden, wobei zwischen definierten Grenzwerten einer Temperaturhysterese ein Heizvorgang bei T-max aktiv ist und bei T-min wieder ausgeschaltet wird.

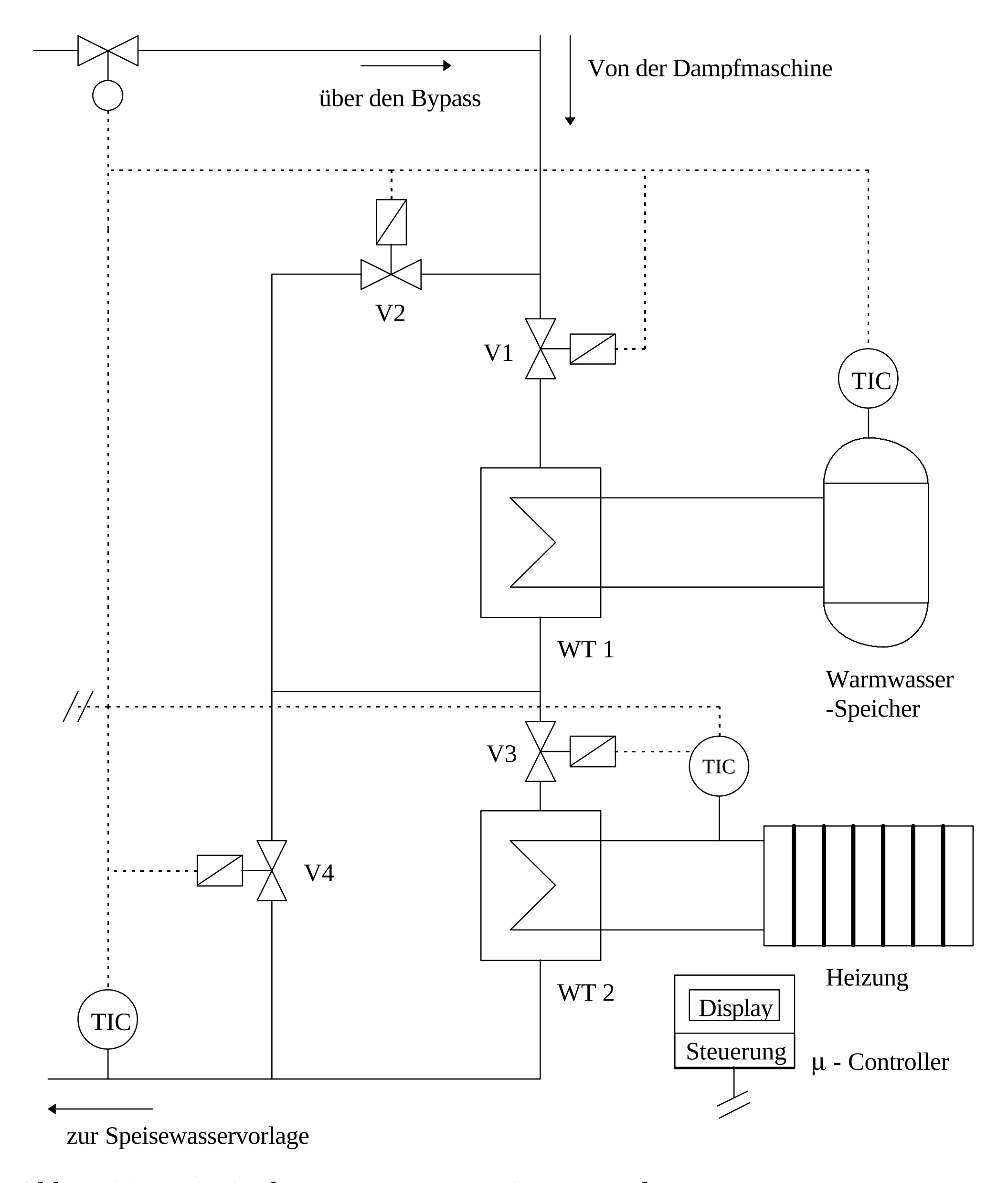


Abb. 7.14. Prinzip der Warmwasser-Heizungsregelung

Die obige Darstellung zeigt das Prinzip zur Regelung des Wärmebedarfs.

Die Warmwasserversorgung und Heizung wurden über verschiedene Wärmetauscher realisiert. Abweichend zum experimentellen Aufbau ist dieses Schema ausführlicher ausgeführt, da im Gegensatz zum Versuch die Heizung im Mittel den dominierenden Wärmeverbraucher darstellt. Für experimentelle Untersuchungen zum Steuerungskonzept kann der Warmwassserspeicher alternativ auch einen Heizungsbetrieb darstellen.

Ein hier nicht aufgeführter Wärmespeicher zur Pufferung von Wärmespitzen kann parallel in den Heizungskreislauf in der üblichen Form eingebunden werden. Wenn es sich vermeiden läßt, sollte aber darauf verzichtet werden, um den Vorteil eines zeitweise niedrigeren Temperaturniveaus für den Heizungsvorlauf nutzen zu können.

Denn wie die Ausführungen der theoretischen Zusammenhänge gezeigt haben, ist eine niedrige Temperatur im Kondensator (Wärmetauscher) besonders vorteilhaft für den Wirkungsgrad zur Stromerzeugung (Abb 6.6).

Im Gegensatz zu der üblicherweise stetig durch die Außentemperatur geführte Heizungsregelung, erfolgt die Temperaturreglung des isolierten Warmwasserspeichers diskret über eine Min-und-Max-Schaltung.

Die Solltemperatur für den Warmwasserspeicher sollte aus hygienischen Gründen nicht zu niedrig gewählt werden, um die Legionellenbildung zu vermeiden. Dies bedeutet mindestens 67°C für das Warmwasser. Die Werkseinstellung für die Regelung beträgt in Deutschland aus Energiespargründen 60°C [7.3].

Der Hauptgrund für den Vorschlag einer getrennten Wärmetauschertechnik ist die Möglichkeit in Zeiten schwächerer Heizungsanforderungen die niedrigeren Vorlauftemperaturen für eine effektivere Stromerzeugung ausnutzen zu können.

Dies betrifft insbesondere die Übergangsphasen zu Beginn und Ende der Heizperiode, die auch entscheidend für die Dimensionierung der PV-Anlage sind.

Die Magnetventile V1 bis V4 ermöglichen durch Schaltkombinationen alternative Wegeschaltungen sowohl für die Versorgung entweder von WT1 oder WT2 oder von (WT1+WT2), als auch für eine Dampfführung an beiden Wärmetauschern vorbei.

Die Vorgabe der Sollwerte für die Vorlauftemperatur und Warmwassertemperatur erfolgt durch die Steuerung. Die eigentliche Regelung dieser Temperaturen erfolgt mit Hilfe einer Kaskadenregelung [7.11] über die Kondensattemperatur.

Gibt der direkt mit dem Temperatur-Sollwert verknüpfte *innere* Regler seinen Ausgang als sekundären Sollwert auf den *äußeren* Regler für die Kondensatrücklauftemperatur, so wird die Dampfmenge im Bypass solange verändert, bis ein Abgleich stattgefunden hat.

Weitere Einzelheiten dazu werden bei der Beschreibung des Steuerungskonzepts erläutert.

7.6 Steuerungskonzept

Der erste Schritt zur Implementierung einer Steuerung besteht in der Bestandsaufnahme aller Meßaufnehmer und geplanten Regelkreise, wie sie vorausschauend aufgrund vorhandener Erfahrungen und Vorversuche in dem vorgestellten Fließschema aufgeführt sind. Die dort gewählte Leitungsführung, die für nötig befundenen Meßaufnehmer und eingezeichneten Wirklinien nehmen bereits implizit eine Grundvorstellung von dem Verfahrensablauf vorweg.

Für die Definition der erforderlichen Verfahrensschritte ist dann allerdings ein detaillierteres Wissen über das Systemverhalten und die Aufgabenstellung des Systems erforderlich, das sowohl durch theoretische Analysen als auch durch gezielte Versuche oder Erfahrungen mit ähnlichen verfahrenstechnischen Funktionen abgesichert sein muß. In diesem Sinne wird hier ein Programmablauf und Steuerungskonzept für dieses Hybridsystem vorgestellt, wobei der Versuchsaufbau aufgrund der derzeitigen Realisierungsmöglichkeiten eine komplette Implementierung einer solchen Steuerung nicht im vollen Umfang erlaubt.

Zur Automatisierung des Anlagenbetriebs müssen zunächst Programm-Ablauf-Schritte definiert werden. Grundlage für die Aufstellung dieser Ablaufschritte bildet dabei die Abfolge der vorher im 'Handbetrieb' erforderlichen 'manuellen' Tätigkeiten, um die Anlage in gewünschte mögliche und sinnvolle Betriebszustände zu versetzen.

Damit ergibt sich die folgende Aufstellung der ***Verfahrensschritte***:

Schrittnummer	Schritt-Bezeichnung
1	Dampferzeuger einschalten
2	Wegeschaltung
3	Vorbereitung
4	Wegeschaltung
5	Anfahren
6	Dampfmaschine "Arbeitsmodus"
7	Dampfmaschine "Ruhemodus"
8	Dampfmaschine "Pausenmodus"
9	Wegeschaltung
10	Maschine-Stop "PV-Modus"

Tabelle 7.2. Verfahrens-Ablauf-Schema

Für den Beginn eines automatischen Programmablaufs müssen in der Regel gewisse Einschaltbedingungen erfüllt werden, die von dem Programm überprüft werden, damit sichergestellt wird, daß eine erfolgreiche Durchführung überhaupt zu erwarten ist. Ansonsten erfolgt lediglich eine Fehlermeldung.

Eine solche ***Schrittkette*** wird im Programm primär entsprechend der Schrittnummer abgearbeitet, wobei der Übergang zum nächsten Schritt meist mit einer Rückmeldung als Bestätigung für die Erfüllung einer gesetzten Bedingung eingeleitet wird.

Wenn ein eigentlicher stationärer Arbeitszustand erreicht wird, werden mehrere innere Schritte in einer bedingten Schleife permanent ablaufen.

Weiterschaltbedingungen können sowohl interne Signale aufgrund erreichter Zustände sein, als auch externe, wie zum Beispiel manuell über ein Display gesetzte.

Die Verarbeitung der Meßsignale und Eingaben sowie die Realisierung des Programmablaufs kann mit Hilfe einer entwickelten ***m - Controller*** gestützten Steuerungseinheit mit Display erfolgen.

Die Darstellung der wesentlichen stattfindenden Vorgänge bei den einzelnen Verfahrensschritten erfolgt in einer in der Verfahrenstechnik häufig gewählten Form für Programmvorgaben, wie im folgenden '*Programmablauf*' beschrieben:

Manuelle Vorbereitungen

- Sichtkontrolle
- Brennstoffzufuhr ermöglichen
- Wasseranschluß öffnen
- vorhandene Absperrventile öffnen

0. *Hybridsystem-Programm starten (manuell)*
   - Steuerung-Hochlauf mit Selbsttest
   - Vorwahl Heizung ja/nein ? (manuell) , Eingabe permanent möglich
   - Vorwahl KWK ja/nein ? (manuell) , Eingabe permanent möglich
   - Eingabe frei wählbarer Sollwerte (manuell), Eingabe permanent möglich
   - "Laderegelung" als permanentes Unterprogramm aktivieren

1. Dampferzeuger einschalten
   - Druckerhöhungspumpe fördert
   - Verdampfung läuft
   - Drucküberwachung (→ Binär-Signal ≡ Weiterschaltbedingung)
   - Übergang zum permanenten Unterprogramm "Dampferzeugung"
   - Ohne KWK : permanentes Unterprogramm "Wärmeversorgung" mit Wärme-Regelung aktiv : Schritt 10

2. Wegeschaltung
   - Freischaltung der Hauptdampfleitung
   - Drosselventil zur Maschine in definierten Hub

   Weiterschaltbedingung : Zeitintervall abgelaufen

3. Vorbereitung
   - Kurzschlußleitung freischalten
   - freiblasen und Vorheizen der Dampfleitungen zur Maschine

   Weiterschaltbedingung : Zeitintervall abgelaufen

4. Wegeschaltung
   - Kurzschlußleitung schließen
   - Leitung zur Maschine freischalten

5. Anfahren
   - Generator über Wechselrichter in "Motorbetrieb" bei kleiner definierter Drehzahl n_A als Anlaufhilfe,
   - Entwässerung der Maschine
   - Drehzahlregelung für Dampfmaschine aktivieren mit Arbeitsdrehzahl n_{Arbeit}
   - Dampfmaschine übernimmt Antrieb und überschreitet n_A
   - Wechselrichter in "Rekuperationsmodus" d.h. Generatorbetrieb mit Gleichrichtung , Batterie laden
   - permanentes Unterprogramm "Wärmeversorgung" mit Wärme-Regelung aktiv

6. Dampfmaschine "Arbeitsmodus"
   - Stromerzeugung mit Drehzahl n_{Arbeit} , volle Leistung
   - Batterie laden bis definiertes Niveau Min1

7. Dampfmaschine "Ruhemodus"
   - Stromerzeugung mit Drehzahl $n_{Ruhe} < n_{Arbeit}$, Minderleistung
   - Batterie laden bis definiertes Niveau Max (Voll) : Schritt 8
   - Batterie-Ldezustand Min2 : Schritt 6

8. Dampfmaschine "Pausenmodus"
   - Drehzahl $n_{Pause} < n_{Ruhe}$ bei abgekoppelter Last , keine elektr. Leistung
   - Wartezustand
   - Batterie-Ladezustand Min2 : Schritt 6

   Weiterschaltbedingung : Warte-Zeitintervall abgelaufen

9. Wegeschaltung
   - Dampfleitung zur Dampfmaschine sperren
   - Drosselventil auf definierten Hub

   Weiterschaltbedingung : Zeitintervall abgelaufen

10. Maschine Stop "PV-Modus"
    - Maschine außer Betrieb
      PV-Anlage liefert Strom bzw. Batterie voll
    - Batterie-Ldezustand Min2 : * Schritt 3 falls *mit* KWK
      * Alarm falls *ohne* KWK ⇒ KWK aktivieren (auch als automatische Option möglich: Schritt 3 nur in diesem Fall)
    - Batterie-Ladezustand Min-abs : Laderegler trennt Last ⇒ Fehlermeldung

Der gewählte Zustand "*mit* KWK" wird automatisch zurückgenommen, wenn keine Wärmeabnahme mehr erfolgen kann und wieder freigegeben, wenn eine Wärmeanforderung auftritt.

In der Regel wird das Programm immer aktiv sein. Die Laderegelung der Batterien über die PV-Anlage sollte immer unabhängig arbeiten können. Außer der Stromversorgung wird Warmwasser ebenfalls meist ganzjährig benötigt.

Wird die Anlage ausgeschaltet, sollte im Falle eines vorherigen KWK-Betriebes ein separater Programmschritt zum Herunterfahren der Anlage für eine gewisse Wärmetauscher-Nachlaufzeit zum Abbau der Dampf-Restwärme sorgen, bevor die Ventile in den Grundzustand versetzt werden.

Eine der möglichen Einschaltbedingungen ist zum Beispiel eine Rückmeldung von der Wasseraufbereitung, daß ein ausreichender Wasserstand vorhanden ist.

Wichtig für einen sicheren Betrieb der Anlage ist eine Absicherung der Betriebszustände gegen ein Fehlverhalten, das zum Schaden führen kann oder gar die Sicherheit gefährdet. Hierfür ist eine entsprechende Ausstattung mit Sensoren zur Erfassung von Meßwerten vorzusehen, wie zum Beispiel Temperatur und Druckaufnehmer. So dürfen sich die Meßgrößen während der Verfahrensschritte nur innerhalb gewisser Grenzen bewegen. Im Fall einer unzulässigen oder unlogischen Überschreitung ist im Programm eine dem Fehlerfall angemessene Reaktion zuzuordnen, die von einem einfachen *Hinweis* bis zur *Fehlermeldung* und *Alarmmeldung* mit Stillsetzung der Anlage führen kann.

Ein Hinweis wäre zum Beispiel eine Meldung, daß die Kapazität eines Ionenaustauschers der Wasseraufbereitung bald zur Neige geht und regeneriert, oder ersetzt werden muß. Es ist auch sinnvoll in regelmäßigen definierten Abständen automatisch auf Wartungserfordernisse hinzuweisen, wie etwa die Aufforderung Batteriewasser zu kontrollieren und nachzufüllen.

Eine Fehlermeldung könnte auf ein zu träges Regelverhalten hinweisen, das sich durch zu lange Einstellzeiten bei Sollwertwechseln bemerkbar macht.

Fehlermeldungen sind als Warnsignale für möglicherweise bevorstehende Alarmzustände ein sinnvolles Überwachungselement.

Alarmzustände ergeben sich aus 'massiven' Fehlfunktionen, die entweder die Sicherheit von Menschen oder die Zerstörungsmöglichkeit der Anlage zur Folge haben können.

Ein sofortiges Sicherheitsabschalten und die Ausgabe eines optisches und akustisches Alarmsignals sind die hierfür angemessenen Maßnahmen. Ein Grund für einen solchen Alarmfall könnte zum Beispiel ein Überschreiten der gesetzten Maschinen-Grenz-Drehzahl sein, was auf einen gerissenen Keilriemen oder einen Kupplungsfehler hinweist.

Es ist sinnvoll, *Unterprogramme* zu definieren, die nach ihrem Aufruf selbständig unabhängig zum Hauptprogramm so lange ablaufen, bis ein Stop-Befehl deren Beendigung einleitet. Dies sind hier die "Dampferzeugung", "Laderegelung" und die "Wärmeversorgung". Diese Unterprogramme betreffen in dieser Reihenfolge die Gesamtenergielieferung, Stromlieferung und die Wärmelieferung mit ihren dazugehörigen Regelkreisen.

Die Betriebsführung mit Hilfe dieser Regelkreise hat sicherzustellen, daß bei der Stromerzeugung mit der Dampfmaschine der Energieinhalt des Abdampfes auf keinen Fall die abnehmbare Wärmemenge überschreitet. Dieser Zustand wird durch das Überschreiten der vorgegebenen Kondensatrücklauf-Grenztemperatur erkennbar, denn ab 100°C 'schlägt der Dampf durch'. Falls dies geschieht, ist auf einen Betrieb ohne KWK umzuschalten. Hält dieser Zustand länger an, so kann dies bei unzureichender PV-Leistung zur Batterieentladung bis zum gesetzten Minimum führen, und eine Abtrennung der Stromverbraucher ist die Folge.

Diese prinzipiell denkbare Situation sollte durch eine Auslegungstoleranz vorbeugend bei der Dimensionierung berücksichtigt werden, um die Wahrscheinlichkeit so gering wie möglich zu halten.

Hier kann auch ein sogenanntes Verbraucher-Management sinnvoll sein, das generell oder abhängig vom Batteriefüllstand eine Gleichzeitigkeit starker Stromverbraucher ausschließt [7.13]. So kann zum Beispiel die Waschmaschine oder der Geschirrspüler eine Pause einlegen, wenn der Ofen zum Kochen eingeschaltet wird.

Diese Maßnahme sollte bei der jeweiligen Anlagenauslegung den vorbeugend zu wählenden Überkapazitäten gegenübergestellt werden, um den apparativen Aufwand sinnvoll begrenzen zu können.

Die Regelung des Dampferzeugers sollte direkt in diesem untergebracht werden, da die individuelle Freiheit der Brennstoffwahl ja nur möglich ist, wenn der Dampferzeuger unabhängig vom Rest der Anlage auswählbar ist. Anzuregen wäre in diesem Fall eine Signalaustausch-Schnittstelle, die der Steuerung die Betriebsdaten des Verdampfers zur Verfügung stellen kann, und auch darüber das Ein- und Ausschalten ermöglicht. So würde diese Rückkopplung auch die Sicherheit erhöhen.

Selbstverständlich kann diese Regelung im Zuge einer Standardisierung auch vom übergeordneten Steuerungsrechner des Gesamtsystems übernommen werden.

Die Regelung der Wärmeversorgung erfolgt über die Erfassung der Temperatur des Kondensat-Rücklaufs. Der Sollwert dieser Temperatur wird entweder vom Heizregelkreis oder vom Heißwasser-Regelkreis nachgeführt, bis ausreichend Wärme zur Verfügung steht. Dies geschieht also mit Hilfe einer sogenannten Kaskaden- oder Folgeregelung [7.11].

Wird zum Beispiel eine Heißwassertemperatur von X°C erwünscht, so liegt die Kondensatrücklauf-Temperatur mit Sicherheit darüber. Geht man bei dem Heißwasser von einer Zweipunktregelung [7.11] aus, so wird bei einem Absinken der Temperatur auf $(X\text{-}DT)$°C der Wärmetauscher hierfür freigeschaltet. Der Sollwert für den Kondensatrücklauf muß dann auf $(X+2DT)$°C gesetzt werden und solange gehalten, bis das Heißwasser $(X+DT)$°C erreicht hat.

Bei dem Heizkreislauf hingegen kann stetig mit einer hinreichend langsamen, nach oben begrenzten Sollwertnachführung im Kondensatrücklauf die erforderliche variable Vorlauftemperatur erreicht werden. Diese Vorlauftemperatur wird in der Regel mit Hilfe hinterlegter Kennlinien der Außen-Lufttemperatur angepaßt. Somit ergibt sich ein kontinuierlicher Regelprozeß.

Für den Fall, daß beide Wärmekreise, also Heizung und Heißwasser, gleichzeitig aktiv sein müssen, ist für den Sollwert des Kondensatrücklauf das Maximum von {Heißwasser-Temperatur, Heizung-Vorlauftemperatur}anzusetzen.

Diese Prozeßführung erlaubt während der Phasen mit möglicher niedriger Kondensatrücklauf-Temperatur, also weniger Wärmebedarf, einen Betrieb der Dampfmaschine mit maximaler Ausnutzung bezüglich des Wirkungsgrades. Dieser ist, wie bereits gezeigt, vergleichsweise empfindlich abhängig vom Kondensatordruck, der in diesem Sinne auf diese Weise so niedrig wie möglich einzustellen ist.

Dieser Effekt kann sich natürlich nur auswirken, wenn eine Kondensat-Rücklaufpumpe eine Druckdifferenz zum offenen Speisewasserbehälter bis zu 1 bar aufrechterhält, damit nicht konstant gegen Atmosphärendruck gearbeitet werden muß.

Ist diese Pumpe nicht vorhanden, so ist der Ausgangsdruck der Dampfmaschine nahezu konstant, der Wirkungsgrad ist an der unteren Grenze, und somit kann die Kondensatrücklauf-Temperatur nahezu konstant bei 100°C (1 bar) gehalten werden. Man kann sich dann auf eine Temperatur-Grenzwert-Überwachung im Kondensatrücklauf beschränken. Dies vereinfacht natürlich die Regelstruktur, nutzt aber die verfügbare Exergie nicht optimal. Die endgültige Entscheidung für die vorzuziehende Betriebsweise kann letztlich nur aufgrund praktischer Erfahrungen mit real eingesetzten 'Pilotanlagen' getroffen werden.

Im Winter wird ein ständiger Wechsel zwischen den möglichen Wärmetauscher-Kombinationen stattfinden, während im Sommer die Heißwassererzeugung dominiert.

Insbesondere in den Monaten Juni, Juli und August ruht in der Regel der Heizungsbetrieb [7.3].

Die verschiedenen vorgeschlagenen Betriebszustände der Dampfmaschine sollen einerseits der PV-Anlage ausreichend Zeit geben die Batterien aufzuladen, und andererseits soll ein schnelles Hochfahren möglich sein.

So soll ein Betrieb der Maschine mit voller Leistung nur bei Erreichen eines definierten Tiefstandes einsetzen und einen Ladestrom bis zu einem Ladezustand noch unterhalb des Maximums liefern. Danach könnte die Maschine mit einer Minderleistung weiterlaufen, bis entweder die PV-Anlage oder die Maschine die Batterie bis zum Maximum geladen hat. Wenn der Verbauch höher liegt, wird sich der Arbeitsmodus mit voller Drehzahl wiederholen müssen.

Ist die Batterie voll, so ist es sinnvoll, den Generator von der Last zu trennen und im Leerlauf zu betreiben, bis halbwegs sichergestellt ist, daß ein Wiederanlaufen kurzfristig nicht zu erwarten ist. Dann kann die Maschine gestoppt werden.

Dies hat natürlich Kondensationsvorgänge in der Maschine und in den Frischdampfleitungen zur Folge, so daß bei erneutem Anlauf zunächst ein Rücksprung in den Vorbereitungsschritt nötig ist.

Die Tatsache, daß eine Dampfmaschine bis zu einem Viertel der Nennleistung heruntergefahren werden kann, ohne nennenswerte Effektivitätseinbußen [7.14], spricht zumindest von dieser Seite nicht gegen eine Drehzahlumschaltung.

Ein weiteres Argument für diese Vorgehensweise ist der sich einstellende effektive Wirkungsgrad der Batterie, denn je weniger Strom über einen Ladezustand geführt wird, desto höher ist die Energieausnutzung. Darauf wird im Kapitel 7.7 noch einmal näher eingegangen (Abb. 7.21).
Es ist also zu empfehlen, die Stromerzeugung kontinuierlich zu gestalten, also möglichst nicht viel höher als der mittlere Bedarf, aber auch nicht so wenig mehr, daß ein Versorgungsdefizit auftreten kann. Mit anderen Worten, der Anteil an direkt genutztem Strom sollte so hoch wie möglich liegen.

Nicht minder wichtig in diesem Zusammenhang sind die Eigenschaften von einsetzbaren Dampferzeugern.

Wird der Brenner eines Verdampfers, wie wohl anzustreben ist, mit '*fester*' Biomasse betrieben, so ist dessen Regelbarkeit und *Teillastfähigkeit* in diese Überlegungen mit einzubeziehen. Denn im Gegensatz zu Gasen oder Flüssigkeiten sind feste Brennstoffe in der Regel nicht vergleichbar gut zu dosieren, zumal *Holzstückgut* bei der Biomasse einen nicht unerheblichen Anteil hat [7.1]. Deshalb spricht auch dieser Gesichtspunkt für eine dezente *stetige* Betriebsweise der Dampfmaschine.

Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zu der üblichen Betriebsweise von derzeitigen Hybridsystemen mit Verbrennungsmotoren (Dieselmotor, Gasmotor) dar, deren Einsätze bei kurzfristigen Ladevorgängen effektiver sind [7.15].

Betrachtet man die herausgearbeiteten Lastganglinien eines durchschnittlichen privaten Haushalts für einen typischen Sommer- und Wintertag, so erkennt man hier unschwer ein gutes Maß an Gleichzeitigkeit von Strom und Wärme. Somit besteht hier eine gute Möglichkeit zeitgleich Strom und Wärme in der gewünschten Größenordnung halbwegs kontinuierlich zur Verfügung stellen zu können. Dies würde auch eine geringere Notwendigkeit für einen Wärmespeicher zur Folge haben. Diese Fragestellungen werden im nächsten Kapitel zur Dimensionierung der Anlage genauer betrachtet.

7.7 Simulation des Hybridsystems

Um eine verfeinerte Auslegung bezüglich der Komponenten in gegenseitiger Abstimmung vornehmen zu können, wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, das die Funktionsweise nach Vorgabe von Dimensionierungsgrößen in Bezug auf Massen- und Energieströmen aufzeigen kann. Somit ergibt sich ein wertvolles Hilfsmittel zur Auslegung einzelner Komponenten bei gleichzeitiger Bilanzüberprüfung. In Kombination mit den praktischen verfahrenstechnischen Versuchsaufbauten und den daraus gewonnen Erfahrungen steht eine recht solide Basis zur Dimensionierung solcher Hybridsysteme zur Verfügung. Außerdem kann dieses Programm als Grundlage für ein ausbaufähiges Expertensystem dienen, das im Rahmen denkbarer zukünftiger Entwicklungen und Pilotprojekte zu einem schlagkräftigen Instrument ausreifen kann.

Dieses Simulationsprogramm wurde mit dem Softwarepaket '*LabView*' der Fa. National Instruments erstellt. Die Programmiersprache 'G' ist graphisch, im Gegensatz zu den üblichen textorientierten und arbeitet mit bildlichen Struktogrammen, die direkt compiliert werden, ohne den Umweg über eine Textkonvertierung.

Zur Implementierung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten, insbesondere der thermodynamischen Zustandfunktionen, sind etliche in der Regel zweidimensionale numerische Approximationen erforderlich [7.16].

Exemplarisch sei hier in der folgenden Abbildung die Entropie von Heißdampf in Abhängigkeit von Druck und Enthalpie dargestellt.

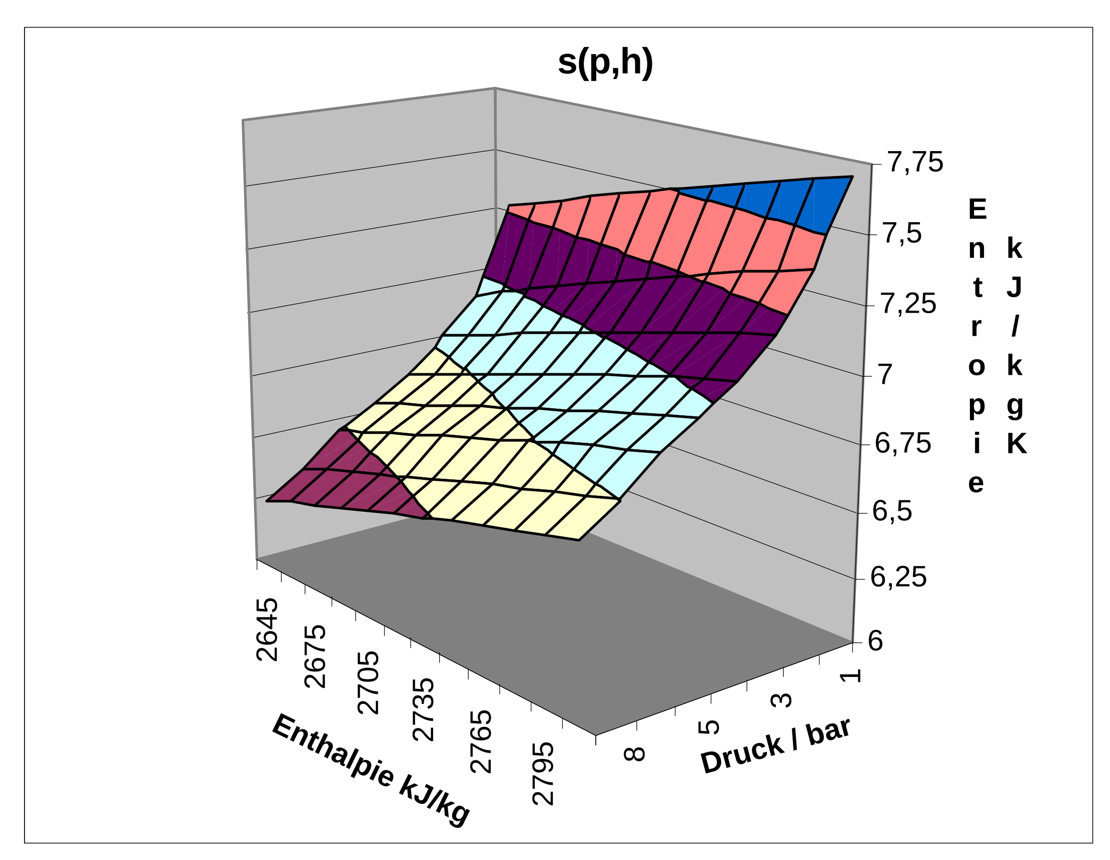


Abb. 7.15. Heißdampf Entropie(p,h)

Die approximierte Funktion lautet:

$$
\begin{aligned}
s = & -7{,}06839066E{+}1 + 2{,}36050449E{+}4 \cdot 1/h + 4{,}26113307E{-}2 \cdot h \\
& - 6{,}30676959E{-}6 \cdot h^2 + 8{,}20048141E{+}1 \cdot 1/p + 4{,}19007759E{+}1 \cdot p \\
& - 6{,}24180603E{+}0 \cdot p^2 + 2{,}81207472E{-}1 \cdot p^3 - 5{,}42070078E{+}4 \cdot 1/(p \cdot h) \\
& - 2{,}60729180E{+}4 \cdot p/h + 4{,}03425513E{+}3 \cdot p^2/h - 1{,}80026596E{+}2 \cdot p^3/h \\
& - 3{,}63407433E{-}2 \cdot h/p - 1{,}93445776E{-}2 \cdot h \cdot p + 2{,}82364152E{-}3 \cdot h \cdot p^2 \\
& - 1{,}27672203E{-}4 \cdot h \cdot p^3 + 5{,}02244666E{-}6 \cdot h^2/p + 2{,}72239117E{-}6 \cdot h^2 \cdot p \\
& - 3{,}93356800E{-}7 \cdot h^2 \cdot p^2 + 1{,}78261779E{-}8 \cdot h^2 \cdot p^3
\end{aligned}
\qquad (7.33)
$$

Die Notwendigkeit für diese Approximation ergibt sich aus der Tatsache, daß bei der Drosselung des Dampfes mit Hilfe der Regelventile ein Druckabbau bei Enthalpie-Erhaltung stattfindet [7.17], bei gleichzeitiger Entropieerhöhung. Diese sich ergebende Entropie wird, wie bereits gezeigt, für die Berechnung des Clausius-Rankine-Prozesses benötigt. Die Enthalpie entspricht derjenigen des Sattdampfes, wie der Dampferzeuger ihn liefert.

Im folgenden wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie sich die Hauptenergieströme berechnen lassen.
Wird Sattdampf von 6 bar mit einer spezifischen Enthalpie $h_3 = 2755{,}2 kJ / kg$ eingedrosselt, so erhält man:

p [bar]	s [kJ/kg K]	v [m³/kg]	ϑ_{Dampf} [°C]
6	6,7555	0,3155	158,84
5	6,8368	0,3781	155,05
4	6,9348	0,4724	151,17

Tabelle 7.3 Drosselung 6 bar Sattdampf

Wie man feststellen kann, handelt es sich bei 4 bar um überhitzten Dampf, da die Temperatur von 151,17 °C über der 5 bar- Sattdampftemperatur von 143,63 °C liegt (Energieerhaltung).

Sei das Füllvolumen der Dampfmaschine V_F = 0,145 Liter,
die Drehzahl der Maschine n = 500 1/min,
und der Kondensatordruck betrage p_{min} = 0,1 bar.

Drosselt man nun entsprechend der obigen Tabelle ein, so kann die Enthalpie h_4 berechnet werden und mit deren Hilfe die mechanische Leistung und Wirkungsgrad der Maschine sowie die Abdampfwärme.

p [bar]	P_{mech} [kW]	η [%]	Abdampf [kW]
6	4,7	24,02	14,9
5	3,8	23,05	12,7
4	2,9	21,83	10,4

Tabelle 7.4 Ergebnisse bei Drosselung von 6 bar Sattdampf

Möchte man zum Beispiel eine mechanische Leistung von 3 kW erhalten, so ist auf 4,15 bar einzudrosseln, dabei wird bei einem Wirkungsgrad von 22% eine Abwärme von 10,6 kW erzeugt. Die Dampfzufuhr ergibt sich dabei zu 19,1 kg/h. Dabei entwickelt die Maschine ein Drehmoment von 57,3 Nm. Bei einem gesamten Wärmebedarf von beispielsweise 20 kW sind über den Bypass noch zusätzlich noch 9,4 kW beizusteuern, dem entsprechen etwa 13,2 kg/h Zusatzdampf. Das P_{mech}-Wärme-Verhältnis beträgt in diesem Fall τ = 0,15, bei einer Dampfmenge von insgesamt 31,1 kg/h.

Sind die Energieströme errechnet, so müssen diese auf nachgeschaltete Komponenten übertragen werden. Hierfür werden Berechnungsformeln mit den entsprechenden Auslegungsparametern benötigt.

Außerdem sind die analog des obigen Beispiels berechneten idealen Energiewerte mit den anzunehmenden Wirkungsgraden der beteiligten Geräte, wie zum Beispiel Dampferzeuger und Dampfmaschine, zu korrigieren. Dies gilt generell für jede Übertragungskomponente. Diese Wirkungsgrade können zusammen mit den anderen Auslegungsparametern über anklickbare Komponenten-Menues im Programm eingegeben werden, wie hier am Beispiel eines Wärmetauschers demonstriert.

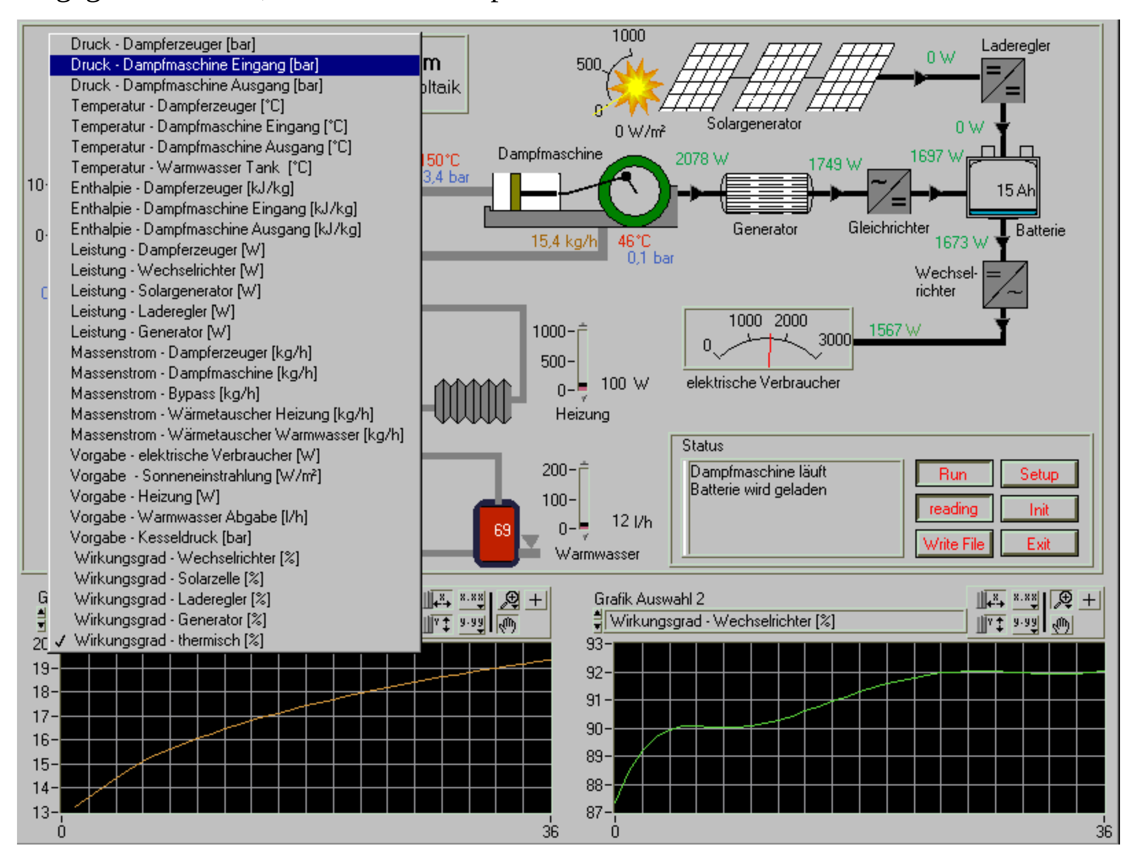


Abb. 7.16 Selektion der grafischen Ausgabe

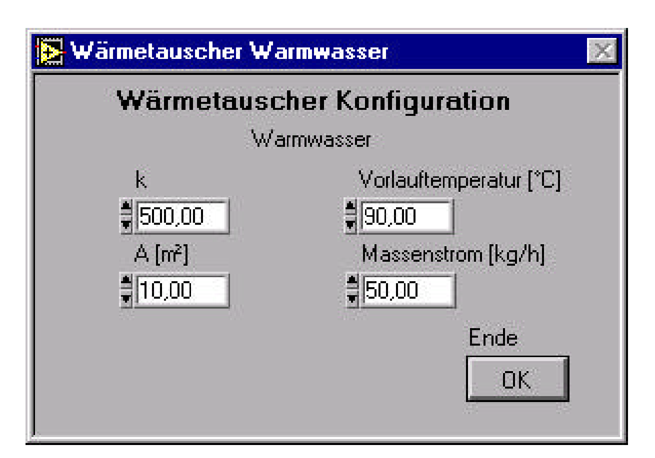


Abb. 7.17. Konfiguration eines Wärmetauschers

Die Vorlauftemperatur hat hier die Funktion des Sollwertes für den dazugehörigen Regelkreis und ist deshalb hier vorgebbar. Bei der Batterie können ebenfalls über den Anfangsladezustand und die Kapazität die Zustände Min und Max definiert werden.
Die gegenseitige Abstimmung der Komponenten kann aufgrund der Komplexität der Anlage nicht automatisch geschehen, sondern muß sukzessive dem Energiefluß folgend mit Hilfe der sich bei der Simulationsrechnung ergebenden Übergabewerte vorgenommen werden. Die sich verändernde Situation bei Parameteränderung wird sofort sichtbar, so daß diese Vorgehensweise durchaus recht zügig zum Ziel führt.

Zusätzlich können für die elektrischen Komponenten und den Solargenerator Wirkungsgradkennlinien in Abhängigkeit von der Auslastung hinterlegt werden.

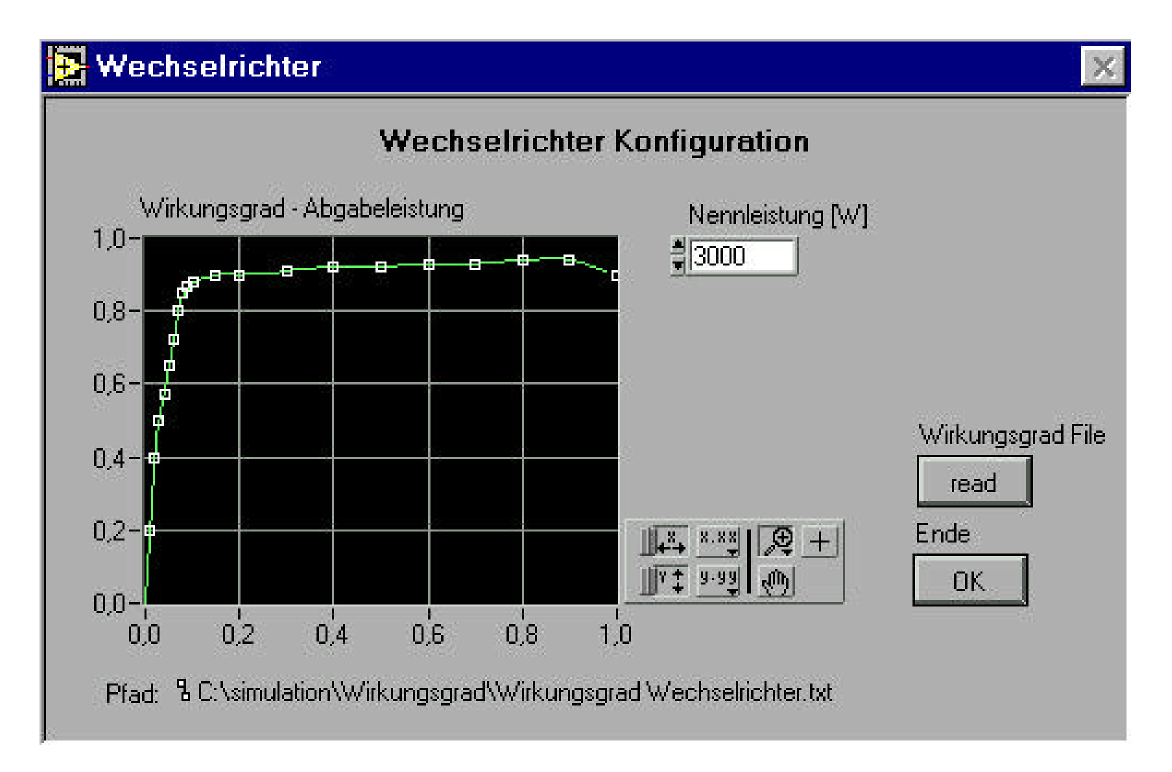
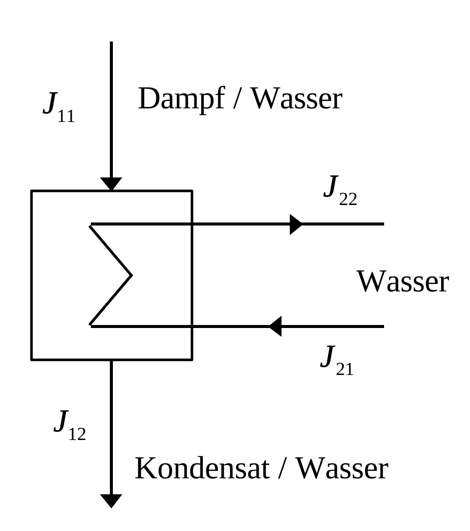


Abb. 7.18 Kennlinie Wechselrichter

Die Energieverbräuche, wie auch die augenblickliche Sonneneinstrahlung, können einfach über Zeiger an den Sinnbildern mit Hilfe der PC-Maus verstellt werden.

Im Gesamtbild er Anlage (Abb. 7.19) werden die Verläufe der Auswirkungen, die sich bei vorgenommenen Parameteränderungen für die Komponenten ergeben, im unteren Abschnitt über eine 'Grafik Auswahl' über einer sich selbständig skalierenden Zeitachse dargestellt. Auf diese Weise kann man einen Gesamtüberblick über den gesamten betrachteten zeitlichen Verlauf erhalten, und kann das Verhalten der einzelnen Bestandteile der Anlage vergleichend gegenüberstellen, um ein besseres Verständnis für die gegenseitigen Wechselwirkungen zu bekommen.

Im folgenden sollen noch einige physikalische Zusammenhänge dargestellt werden, wie sie das Simulationsprogramm berücksichtigt. Zunächst folgen einige Ausführungen zu den Wärmetauschern, die eine entscheidende Rolle bei der Wärmeversorgung spielen. Grundsätzlich sind Wärmetauscher mit Gleichstrom- oder Gegenstrom-Austausch zu unterscheiden. Diese Begriffe beziehen sich auf die Strömungsrichtung der durch die Austauscherfläche getrennten Kreisläufe. Im allgemeinen wird der Gegenstrom bevorzugt. Die dabei übertragene Wärmeleistung läßt sich wie folgt formulieren:



Vorlauftemperaturen: J_{11}, J_{21}
Rücklauftemperaturen: J_{12}, J_{22}

Mittlere Austauschtemperatur:

$$\Delta\vartheta_{\mathrm{m}} = \frac{\vartheta_{11} - \vartheta_{21} - \vartheta_{12} + \vartheta_{22}}{\ln\left(\dfrac{\vartheta_{11} - \vartheta_{21}}{\vartheta_{12} - \vartheta_{22}}\right)} \tag{7.34}$$

Für Dampf gilt: $J_{11} \cong J_{12}$
bei Phasenübergang

Abb. 7.19. Wärmetauscher Gegenstromprinzip

Für die ausgetauschte Wärme gilt einerseits [7.17]

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta J_{m} \tag{7.35}$$

und andererseits

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \left(J_{22} - J_{21}\right) \tag{7.36}$$

mit

$k \equiv$ Übergangskoeffizient [W/kgK] , $A \equiv$ Austauschfläche [m²]

$\dot{m} \equiv$ Massenstrom [kg/s] , $c \cong 4{,}19$ [kJ/kgK] Wärmekapazität Wasser.

Befindet sich eine Kreislaufpumpe im Wasserkreislauf, so gilt für die aufzuwendende elektrische Leistung [7.18]:

$$P_{el,Pumpe} = \frac{\dot{m}}{1000} \cdot \frac{\Delta p}{h_{Pumpe}} . \tag{7.37}$$

Dabei ist Δp [N/m²] der zu überwindende Widerstand und h_{Pumpe} der Wirkungsgrad.

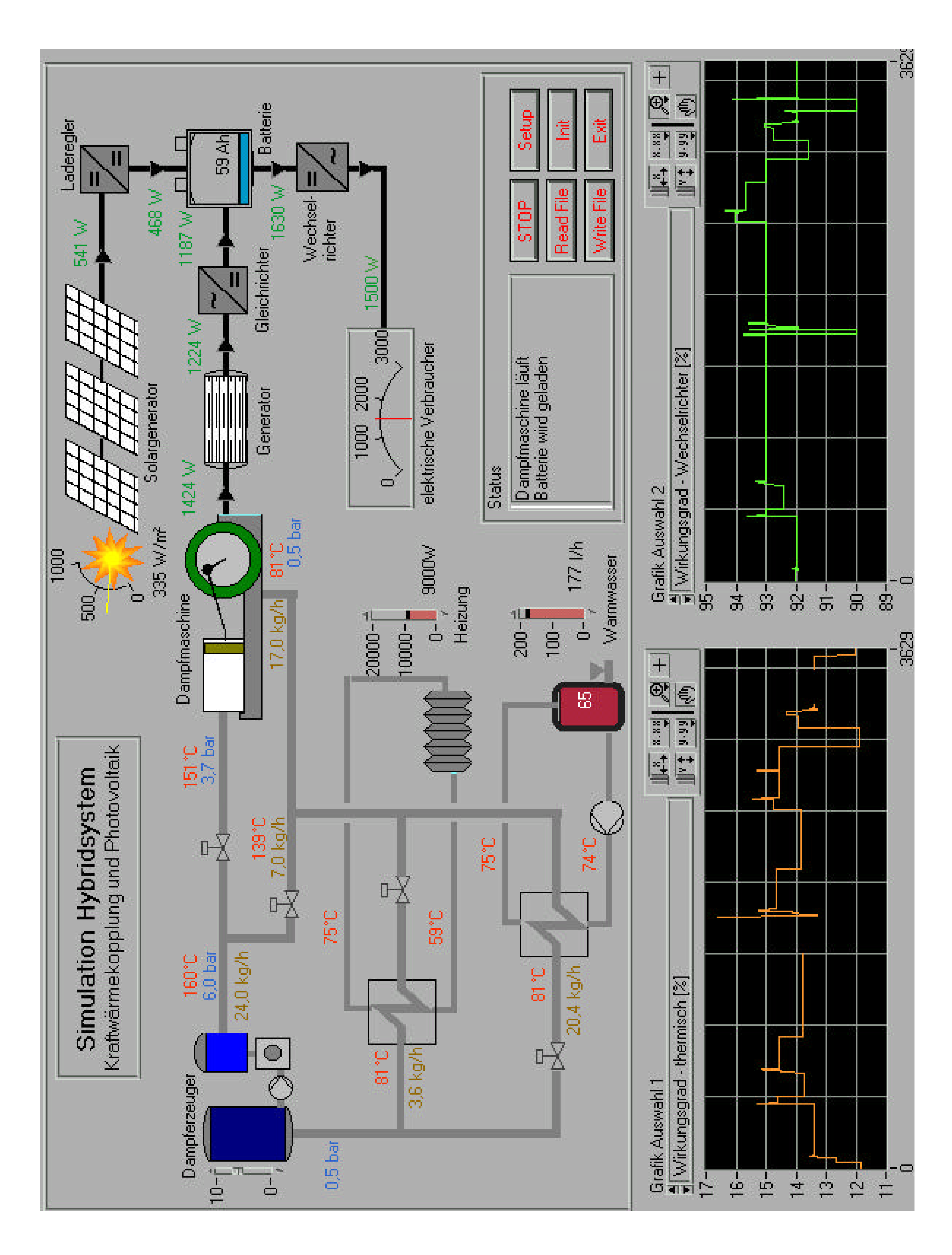


Abb. 7.20 Gesamtbild der Simulation

Zur Eingabe möglicher Wirkungsgrade für die Batterie muß die Stromführungsbilanz näher betrachtet werden. Da nicht sämtliche elektrische Energie durch die Batterie hindurchfließt, ist nicht der direkte Batteriewirkungsgrad anzusetzen.

Die Verbraucher können sowohl über die Batterie, als auch direkt von der PV-Anlage oder dem Generator, mit wechselndem Anteil mit Strom beliefert werden, entsprechend den momentanen Bedingungen.

Dieser Sachverhalt wird dargestellt mit Hilfe eines Bruchteils y über die Batterie und eines Teils x direkt, mit x + y = 100%. Damit kann ein neuer '*effektiver*' Wirkungsgrad ermittelt werden.

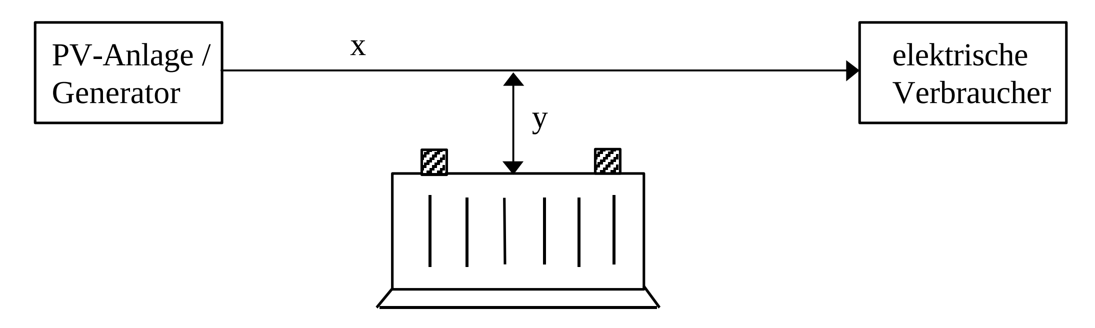


Abb. 7.21 Abschätzung des effektiven Batterie-Wirkungsgrades

Der Anteil y ist mit dem Batterie-Wirkungsgrad h_B verknüpft, dies bedeutet, daß vorher ein Anteil von y / h_B erueugt werden mußte. Damit ergibt sich für 100% Energie ein effektiver Aufwand von $x + y / h_B$ und somit ergibt sich für den effektiven Batterie-Wirkungsgrad:

$$h_{B,effektiv} = \frac{h_B}{h_B \cdot x + y} \quad . \tag{7.38}$$

Rechnet man zum Beispiel mit einem h_B von 80 % und x = 20 % sowie y = 80 %, so erhält man für $h_{B,effektiv}$ einen Wert von etwa 95 %.

Daraus erwächst für die Prozeßführung die Forderung, die Energie, soweit wie möglich, an der Batterie vorbei direkt zu verwerten und nur die Spitzenlast über die Batterie abzudecken. Dieser Umstand ist bei der Entscheidung über die zu wählende Stromerzeugungs-Dynamik mit Hilfe der Dampfmaschine zu berücksichtigen, wobei alle auftretenden Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen sind.

Die bisher hergeleiteten und aufgedeckten Zusammenhänge bieten eine gut fundierte Grundlage um eine konkrete Dimensionierung für die Versorgung eines privaten Haushalts vorzunehmen. Dies soll im nächsten Kapitel geschehen.

8. Dimensionierung für einen Privathaushalt

Zunächst wird ein Bestimmungskriterium für die gegenseitige Abstimmung der PV- und der KWK-Anlage hergeleitet, so daß die Korrelation beider Energiewandler eine lückenlose Energieversorgung privater Haushalte ermöglicht.

8.1 Photovoltaikanlage

Um eine Berechnungsgrundlage der erforderlichen Kenndaten für die PV-Anlage des Hybridsystems zu erhalten, ist zunächst die jahreszeitliche Korrelation zwischen der beschriebenen Verbrauchscharakteristik eines durchschnittlichen privaten Haushalts und dem Stromerzeugungs-Verlauf einer PV-Anlage aufzuzeigen.

Die zu erwartenden Ertragswerte einer PV-Anlage können mit Hilfe der mittleren Globalstrahlungswerte, wie sie in der DIN 4710 (Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauchs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen) auf der Grundlage gemessener Werte verfügbar sind, abgeschätzt werden. Diese Werte basieren auf Messungen, die sich über einen Zeitraum von bis zu 10 Jahren und mehr erstrecken. Man findet dort die Ergebnisse für Berlin, Braunschweig, Hamburg, München und Trier. Für die folgenden Abschätzungen ist es sinnvoll, daraus einen repräsentativen Schnitt für die Jahres- und Tages-Ganglinien herauszuarbeiten, und diese auf die mittlere Jahressumme der Globalstrahlung von 1000 kWh/(m² Jahr) zu normieren. Damit ergibt sich eine Abschätzungsgrundlage für hiesige, sowie vergleichbare klimatische Verhältnisse:

Monat	Wh / (m² Tag)	kWh / (m² Monat)
Januar	655	20,3
Februar	1264	35,4
März	2358	73,1
April	3533	106,0
Mai	4603	142,7
Juni	5197	155,9
Juli	4968	154,0
August	4281	132,7
September	2987	89,6
Oktober	1655	51,3
November	780	23,4
Dezember	500	15,5
Jahr	Mittelwert: 2739	Summe: 1000 kWh/(m² a)

Tabelle 8.1 Gemittelte und genormte Globalstrahlung in Deutschland

Diese Art der Normierung erlaubt ein einfaches Umrechnen der im folgenden hergeleiteten Zusammenhänge auf ortsabhängige tatsächliche statistische Werte. Mit Hilfe dieser Daten und den in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Grundlagen zur PV-Anlage ist es möglich, den realen Ertrag einer '1kW-Referenz-Anlage' abzuschätzen. Diese Referenzanlage sei im folgenden mit "**1 $\mathbf{kW_{ref}}$**" bezeichnet.

Eine 1 kW_{ref}-Anlage sei definiert, indem sie die Gleichung (2.20) wie folgt erfüllt:

$$P_{real} = 1000 \quad W = PR \cdot A_{PV} \cdot h_{PV} \cdot 1000 \quad [W]. \tag{8.1}$$

Mit einer Performance Ratio von $PR = 0{,}75$ und einem PV-Wirkungsgrad von $h_{PV} = 10\%$ als Standardwerte, wird eine Fläche von $A_{PV} = 13{,}33$ m² benötigt. Damit wird der Betrag des Produkts $PR \cdot A_{PV} \cdot h_{PV}$ gleich eins, so daß die Energieerträge dieser Referenz-1kW-Anlage je Tag (Wh) und Monat (kWh) mit den Zahlenwerten der Tabelle 8.1 übereinstimmen.

Damit gilt näherungsweise im zeitlichen Mittel die folgende *Anlagen-Zuordnung*

$$\boxed{1kWp \cong \frac{1kW_{ref}}{PR}}\,. \tag{8.2}$$

Übernimmt nun die PV-Anlage einen Teil der Stromversorgung eines Haushalts, so ergibt sich für den Betrieb der KWK-Anlage ein verbleibendes Strom-Wärme-Verhältnis von $s_{d,PV}$:

$$s_{d,PV} = \frac{8{,}6 + 1{,}6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right) - \overline{P}_{d,PV}[kWh/d]}{15{,}4 + 78{,}36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0{,}232\right)\right)}. \tag{8.3}$$

Dieses verbleibende Verhältnis ergibt sich also als Differenz des Verbrauch bedingten Strom-Wärme-Verhältnisses und dem Verhältnis des Stromanteils von der PV-Anlage zum Wärmebedarf. Mit Rücksicht auf den möglichen Wirkungsgrad der Dampfmaschine muß dieses verbleibende Verhältnis unterhalb eines Grenzwertes u in der Größenordnung von 1:10 bleiben. Allgemein formuliert bedeutet das für den im Mittel täglich mindestens aufzubringenden Energieertrag der PV-Anlage für einen durchschnittlichen privaten Haushalt in [kWh/d]:

$$\overline{P}_{d,PV} \geq 8{,}6 + 1{,}6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right) - u \cdot \left\{15{,}4 + 78{,}36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0{,}232\right)\right)\right\}. \tag{8.4}$$

Diese Bedingung stellt sozusagen die untere Grenze für die Größe der PV-Anlage dar, in Abhängigkeit von u und somit auch vom Gesamtwirkungsgrad der KWK-Anlage.

Zur Bestimmung der erforderlichen PV-Anlagenleistung kann mit Hilfe der Gleichung (8.4) eine Kurvenschar für den rechten Term bezüglich des Parameters u gezeichnet werden, dem die Ertragskurven für Vielfache einer $1kW_{ref}$-Anlage gegenübergestellt werden können. Greift man in dieser Darstellung eine bestimmte Grenzkurve für ein beliebiges u_0 heraus, so ist die Ertragskurve der $1kW_{ref}$-PV-Anlage mit einem Faktor zu skalieren, bis die Grenzkurve gerade noch davon eingeschlossen wird.

Nur dann ist sichergestellt, daß die KWK-Anlage mit einem erfüllbaren Strom-Wärme-Verhältnis von u_0 soviel Strom erzeugen kann, daß in der Summe der Tagesbedarf an Energie gedeckt werden kann.

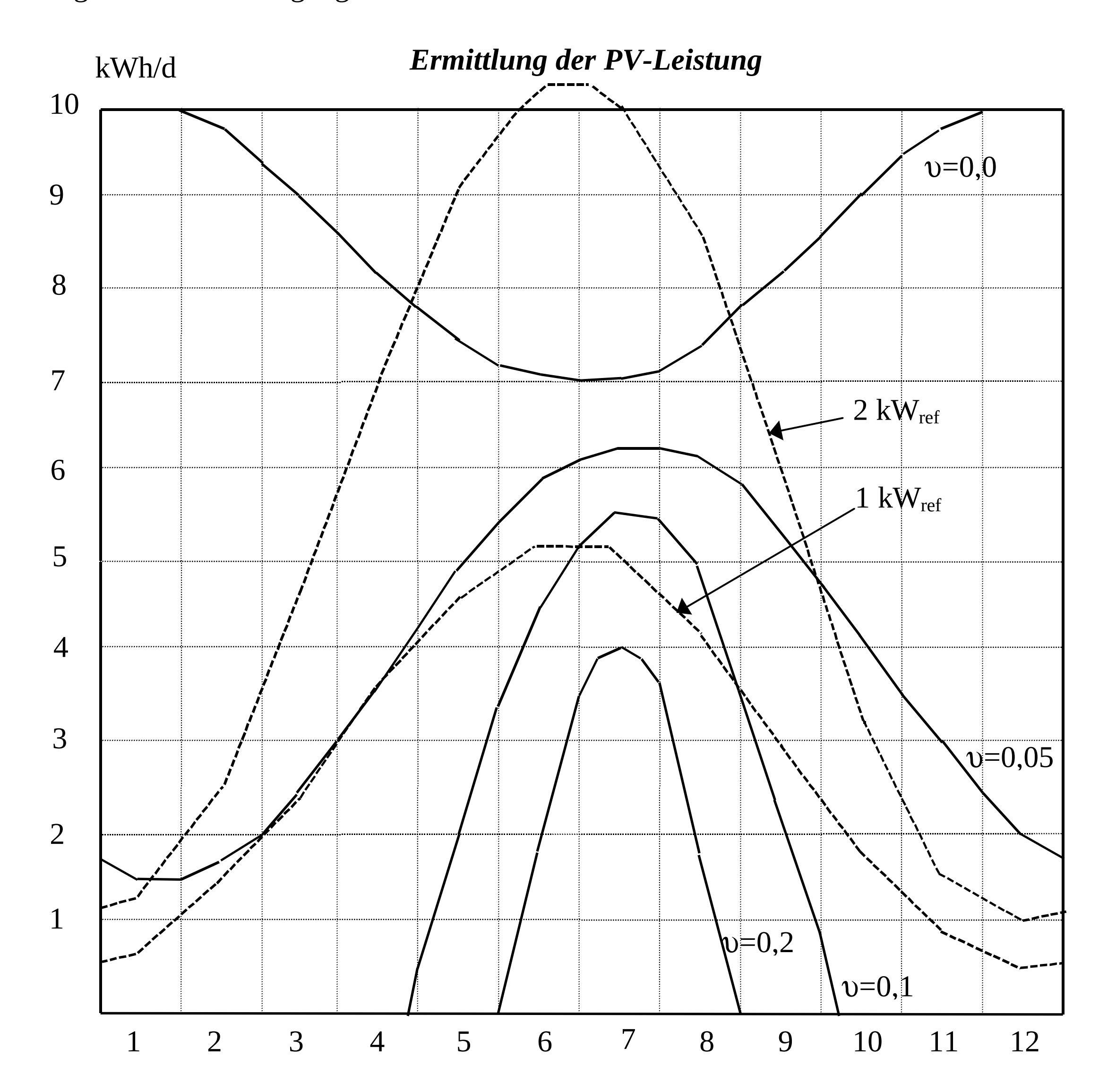


Abb. 8.1 Bestimmung der PV-Anlage für durchschnittlichen Privathaushalt

Die Grenzkurve mit dem Parameter $u = 0,0$ entspricht der Jahresganglinie des Stromverbrauchs für durchschnittlichen privaten Haushalt.

Den Jahresverlauf des Energieertrags einer $1kW_{ref}$-Anlage kann man wie folgt approximieren:

$$\overline{P}_{d.PV}\left(1kW_{ref}\right) \cong \sum_{i=0}^{6} a_i \cdot d^i \quad \text{mit} \quad a_0 = 6{,}347505E-01,\ a_1 = 3{,}7224486E-03$$
$$a_2 = 1{,}818859E-04,\ a_3 = 2{,}818560E-06$$
$$a_4 = -3{,}168738E-08,\ a_5 = 9{,}383729E-11,\ a_6 = -8{,}807513E-14 \qquad (8.5)$$

Mit Hilfe von (8.5) kann man nun zur Auslegung der PV-Anlage wie folgt vorgehen:

Wähle das kleinste mögliche $x \in R$, so daß die Gleichheit in der Bedingung

$$x \cdot \sum_{i=0}^{6} a_i \cdot d^i \geq 8{,}6 + 1{,}6 \cdot \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d\right) - u \cdot \left\{15{,}4 + 78{,}36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2p}{365} \cdot d - 0{,}232\right)\right)\right\}$$
$$\text{mit } (\ d \in [0,\ \ 365]\ ),\ \ x \equiv \text{Skalierung}$$

für ein bestimmtes u_0 für jeden Tag d erfüllbar ist. (8.6)

Dieses Problem kann gut mit einem beliebigen Mathematik-Computerprogramm gelöst werden, das in der Lage ist mehrere Kurven gleichzeitig darzustellen.

So ergibt sich für PV-Anlagen als ***untere Grenze*** :

$$u = 0{,}2 \quad \Rightarrow \quad x \approx 0{,}8 \quad \Rightarrow \quad 0{,}8\ \ kW_{ref}$$
$$u = 0{,}1 \quad \Rightarrow \quad x \approx 1{,}25 \quad \Rightarrow \quad 1{,}25\ kW_{ref}$$
$$u = 0{,}05 \quad \Rightarrow \quad x \approx 4{,}0 \quad \Rightarrow \quad 4{,}0\ \ kW_{ref} \qquad (8.7)$$

In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll, auf die möglichen zukünftigen Änderungen bezüglich des Strom-Wärme-Verhältnisses einzugehen, die sich längerfristig auf der Grundlage neuerer Wärmeschutzverordnungen ergeben können. Sollte sich zum Beispiel die benötigte Wärmemenge halbieren, so ergibt sich für die untere Grenze der PV-Anlage das gleiche Ergebnis, wie es einer Halbierung von u entspricht.

Die ***obere Grenze*** der PV-Anlagengröße würde sich aus der Forderung ergeben, den Strom ganzjährig mit Photovoltaik zu erzeugen. In diesem Fall ist das von der KWK-Anlage zu erfüllende Strom-Wärme-Verhältnis $u = 0$, so daß nur noch Wärmeerzeugung stattfinden muß. In diesem Extremfall ist also keine KWK mehr erforderlich, und es ergibt sich für die PV-Anlage:

$$u = 0{,}0 \quad \Rightarrow \quad x \approx 20 \quad \Rightarrow \quad 20\ \ kW_{ref} \qquad (8.8)$$

Dies ist sicherlich keine sinnvolle Variante, da der damit im Sommer erreichbare Energieertrag mehr als das zehnfache der benötigten Menge betragen würde, ganz abgesehen von dem Flächenbedarf und den sonstigen damit verbundenen Aufwendungen.

Man erkennt aber auf diese Weise recht gut, daß es hier keine eindeutig zu bevorzugende Lösung gibt. Richtet sich zum Beispiel die Dimensionierung der PV-Anlage nach der unteren Grenze, so entspricht dies einer maximalen Auslastung der Dampfmaschine. Verschiebt man andererseits den gewünschten Energieertrag über die Photovoltaik nach oben, in Richtung oberer Grenze, so wird die Maschine in zunehmendem Maße entlastet.

Es ist also möglich, hier in einem gewissen Spielraum eine Abwägung zwischen den Stromerzeugern vorzunehmen, die unter Berücksichtigung aller sonstigen, auch individuellen Rahmenbedingungen und Aufwendungen ein gewisses Optimum in Bezug auf die Versorgungssicherheit darstellt.

Um einen ***Richtwert*** für dieses ***Optimum*** zu erhalten, sei für das von der Dampfmaschine lieferbare Strom-Wärme-Verhältnis ein Wert von $u = 0{,}1$ angenommen. Dieser Wert ist, wie bereits gezeigt, gut erreichbar und dürfte für zukünftige moderne, für diesen Einsatz konzipierte Dampfmaschinen eine untere Grenze darstellen.

Der Energieertrag der PV-Anlage sollte so hoch sein, daß während der Sommermonate ein Betrieb der Dampfmaschine nur in Ausnahmefällen erforderlich ist. Den möglichen Versorgungszeitraum für den Sommer kann man durch die Bestimmung der Schnittpunkte der PV-Ertragslinie mit der Grenzkurve für $u = 0{,}0$ erhalten, wie dies in der Abb. 8.1 für die $2kW_{ref}$-Linie gut zu erkennen ist. Für dieses Beispiel ergibt sich ein Zeitraum von Mai bis August, in dem die PV-Anlage allein für die Stromversorgung ausreichen kann. Das erzielbare Leistungsmaximum erreicht dabei gerade die obere Grenze der gemittelten Lastganglinie entsprechend Gleichung (5.1). Somit erstreckt sich der Energieertrag einer $2kW_{ref}$-Anlage über eine sinnvolle Bandbreite. Dieses Zeitintervall schließt auch den als typisch klassifizierten Sommertag (Ende Mai Anfang Juni, Abb. 5.7) mit einem Stromverbrauch von 7,439 kWh ein. Für diesen Tagestyp liegt das maximal zu erfüllende Strom-Wärme-Verhältnis knapp unter 0,2. Dies würde für den Sommer einem Auslegungswert von $u = 0{,}05$ entsprechen. Wie man der Abb. 8.1 entnehmen kann, wird diese Grenzlinie und damit erst recht diejenige für $u = 0{,}1$, in den Sommermonaten von der $2kW_{ref}$-Kurve ausreichend eingehüllt, so daß die Dampfmaschine hier nicht zum Einsatz zu kommen braucht. Im Vergleich zur unteren Grenze von $1{,}25kW_{ref}$, für die $u = 0{,}1$ ist, stellt ein Richtwert von $2kW_{ref}$ keine übermäßige Erhöhung dar. Damit kann man für einen ***allgemeinen Haushalt*** folgende Dimensionierung begründen:

Richtwert für die PV-Anlage des Hybridsystems:

$$P_{PV} = z \cdot 2kW_{ref} \cong \frac{z \cdot 2}{PR} kWp \qquad (8.9)$$

mit z als Umrechnungsfaktor nach Gleichung (5.13).

Je nach den individuellen Aufstellungs- und Witterungsbedingungen (→PR) mit dem sich daraus ergebenden Stahlungsangebot sind hier Sicherheitszuschläge vorzusehen. Hier zeigt sich auch der Vorteil des modularen Charakters von PV-Anlagen, so daß eventuelle Fehlanpassungen im Nachhinein korrigierbar sind.

Für die praktische Prozeßführung des Hybridsystems ist das verbleibende momentan zu erfüllende Strom-Wärme-Verhältnis für die Dampfmaschine maßgebend. Hierfür ist außer dem bereits ermittelten Jahresverlauf des zu erwartenden Energieertrags der PV-Anlage, der Tagesverlauf für die repräsentativen Sommer- und Wintertage aufzuzeigen.

Analog zur Jahresganglinie zeigt die folgende Tabelle die auf 1000 kWh/(m² Jahr) normierten Strahlungswerte auf der Grundlage von DIN 4710 [8.1]:

Mittlere Tagesgang der Globalstrahlung		
Zeit (Stunden)	***Dezember [W/m²]***	***Mai [W/m²]***
3 - 4	-	0,23
4 - 5	-	11,97
5 - 6	-	63,61
6 - 7	-	152,22
7 - 8	0,39	252,66
8 - 9	11,93	353,28
9 - 10	45,49	436,50
10 - 11	81,90	494,55
11 - 12	103,64	529,53
12 - 13	104,89	522,62
13 - 14	85,02	490,82
14 - 15	50,73	428,03
15 - 16	14,90	351,07
16 - 17	0,86	256,66
17 - 18	-	160,41
18 - 19	-	74,06
19 - 20	-	15,23
20 - 21	-	0,41

Tabelle 8.2 Mittlerer normierter Tagesgang der Globalstrahlung in Deutschland

Für den Winter ist ein Tag im Dezember und für den Sommer ein Tag des Übergangsmonats Mai eine gute Wahl. Der Dezember ist der Monat mit der geringsten Sonneneinstrahlung, und der Mai ist repräsentativ für die hiesige unbestimmte Wetterlage im Sommer.

So besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit, mit Schlußfolgerungen für die Auslegung auf der sicheren Seite zu sein. Damit werden die Energieerträge der Referenz-1kW-Anlage je Stunde (W) mit den Zahlenwerten der Tabelle 8.2 übereinstimmen.

Berücksichtigt man nun den Energieertrag einer installierten $2kW_{ref}$-PV-Anlage für einen durchschnittlichen Haushalt, so führt die Gegenüberstellung mit dem Stromverbrauch zu den folgenden Darstellungen:

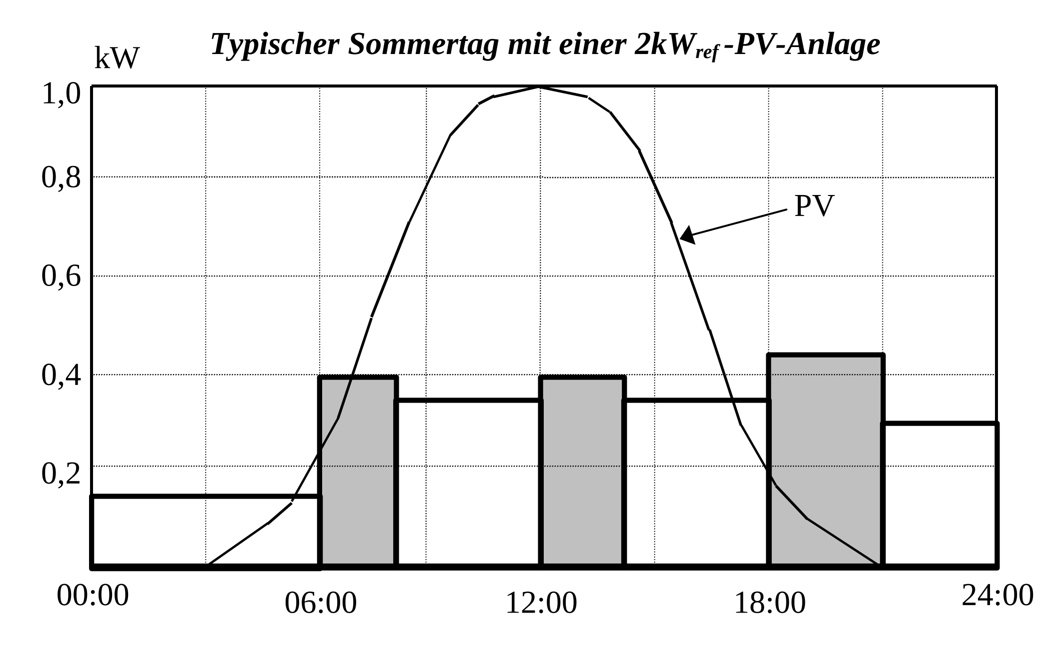


Abb. 8.2 Haushalt mit $2kW_{ref}$-PV-Anlage, Verbrauch und Ertrag im Sommer

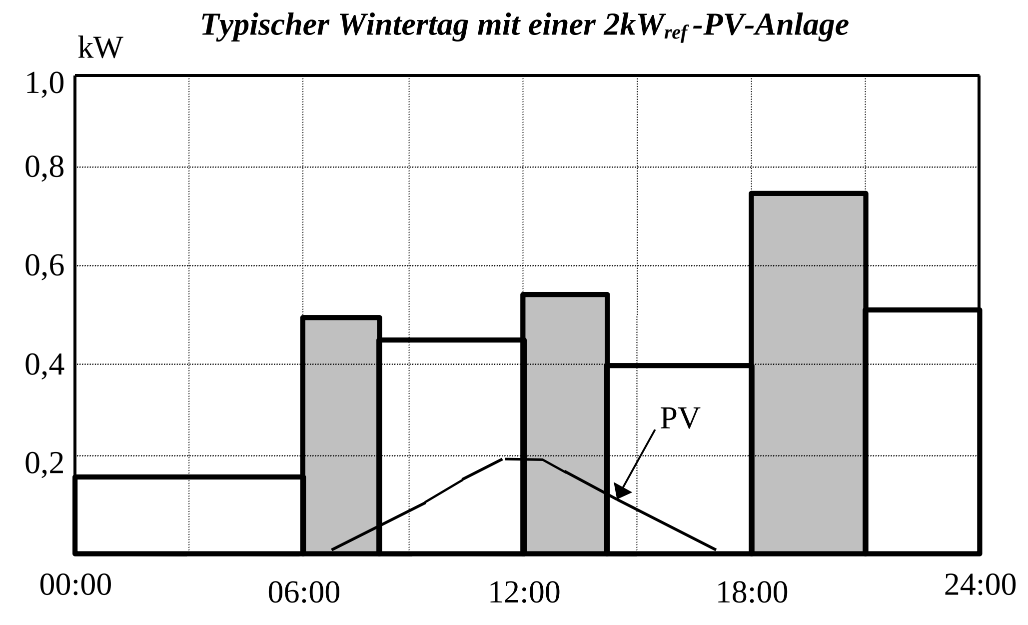


Abb. 8.2 Haushalt mit $2kW_{ref}$-PV-Anlage, Verbrauch und Ertrag im Winter

Während die Darstellung für den Sommer die Notwendigkeit einer Batteriespeicherung verdeutlicht, zeigen die Winterverhältnisse, daß hier kein nennenswerter Beitrag von der PV-Anlage zu erwarten ist, und deshalb für die Auslegung der Dampfmaschine vernachlässigt werden sollte.

8.2 Dampfmaschine

Vernachlässigt man zunächst den Einfluß der Speicherbatterien auf den Stromfluß, so ergibt sich abzüglich des PV-Ertrages rechnerisch ein verbleibendes Strom-Wärme-Verhältnis, das von der Dampfmaschine erfüllbar sein sollte:

$$\sigma_{d,PV} = \frac{8{,}6 + 1{,}6 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot d\right) - 2 \cdot \sum_{i=0}^{6} a_i \cdot d^i}{15{,}4 + 78{,}36 \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot d - 0{,}232\right)\right)} \,. \tag{8.10}$$

Damit ergibt sich die zu erfüllende Jahresganglinie:

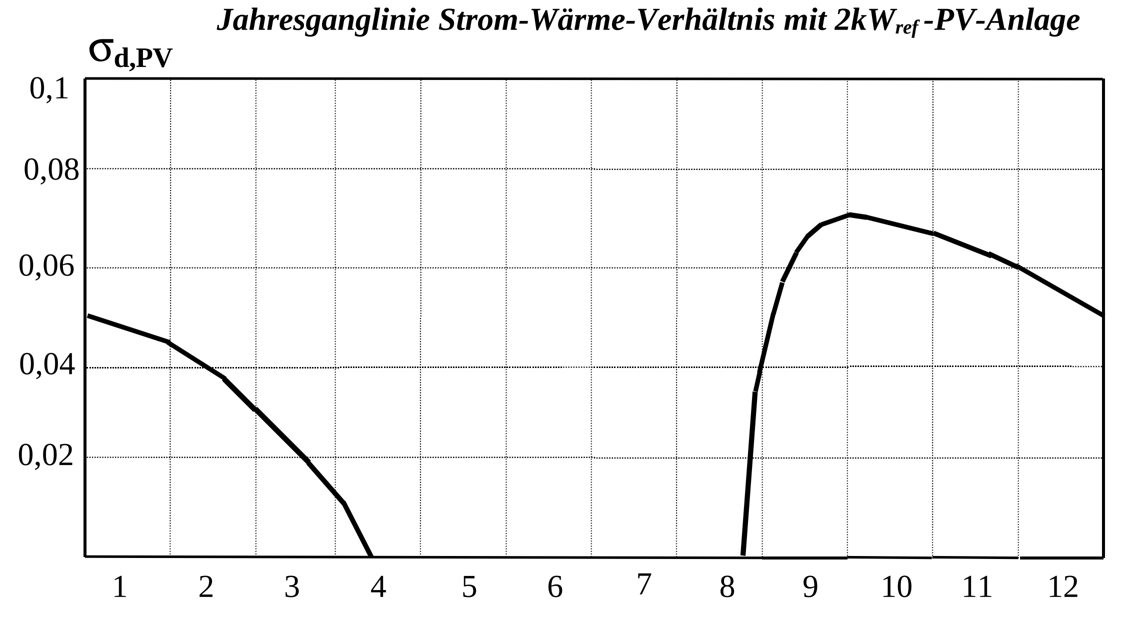


Abb. 8.3 Verbleibendes Strom-Wärme-Verhältnis mit 2kW$_{ref}$-PV-Anlage

Auch hier spiegelt sich die Unsymmetrie der Wärmelastkurve in Bezug auf die Jahresmitte in verstärkter Form wieder. Wie man deutlich erkennt, ist das von der Dampfmaschine zu erfüllende Strom-Wärme-Verhältnis im Mittel jederzeit kleiner als 0,1, so daß der Einsatz dieser Maschine mit Rücksicht auf den Wirkungsgrad unproblematisch ist. Der erforderliche maximale mittlere elektrische Wirkungsgrad der Dampfmaschine liegt hier bei etwa 0,066. Dieser Wert ist im guten Einklang mit dem in der Abb. 5.8 erkennbaren Mittelwert für den Tagesgang des Strom-Wärme-Verhältnisses für einen typischen Wintertag.

Ausnahmen, die durch kurze Stromspitzen auftreten können, werden über die Speicherbatterie abgefangen. Wie Tabelle 5.8 zeigt, betrifft dies einen relativ kleinen Prozentsatz der Gesamtenergie.

Die höchsten Anforderungen an den Wirkungsgrad der Dampfmaschine stellen sich im Herbst, in der Übergangszeit vom Sommer zum Winter. In dieser Zeit sinkt der Ertrag der PV-Anlage bei steigendem Strombedarf, aber vergleichsweise langsamer einsetzender Steigerung des Wärmebedarfs, dessen Maximum im Januar liegt.

Die Dimensionierung der Dampfmaschine sollte sich nach dem Strombedarf im Winter richten, wobei die Auslegungs-Leistung nicht gleich einem Tages- oder Wochenmittelwert sein sollte. Im Interesse eines möglichst hohen Gesamtwirkunggrades ist es sinnvoll, die Maschine so groß zu wählen, daß sie der Anforderungsdynamik weitestgehend folgen kann. Auf diese Weise werden nur die kurzzeitigen Lastspitzen über die Batterie abgedeckt, während der überwiegende Stromanteil direkt zum Wechselrichter oder zur Gleichstrom-Schiene weitergeleitet werden kann.

In diesem Zusammenhang erweist sich das Regelverhalten einer Dampfmaschine als besonderer Vorteil. Es ist möglich, durch Änderungen von V_F , die abgegebenen Leistung bis zu einem Viertel der Nennleistung zu variieren, ohne daß der Wirkungsgrad dadurch nennenswert beeinflußt wird [8.2].

Bleibt also das zu erfüllende Strom-Wärme-Verhältnis mit dem Wirkungsgrad verträglich, so sind die erlaubten Betriebsbereiche nach Abb. 7.8 jederzeit erfüllbar. Bei den in dieser Arbeit festgestellten Bedingungen für einen durchschnittlichen privaten Haushalt können diese Kriterien eingehalten werden. Dies bedeutet auch, daß im Regelfall auf einen Wärmespeicher verzichtet werden kann.

Betrachtet man die Tabelle 5.5 für den typischen Wochenverbrauch eines Haushalts im Winter, so liegt dort das 15-Minuten-Maximum bei 0,85 kW. Der minimale Wert während eines Tages liegt zwischen 00:00 und 06:00 Uhr und beträgt dabei im Mittel 0,15 kW. In diesem Tages-Drittel werden aber nur knapp 9% des täglichen Strombedarfs verbraucht. Für den Rest des Tages liegt das Leistungsniveau, wie Abbildung 5.3 zeigt, im Mittel bei etwa 0,52 kW.

Zusätzlich ist die vorhandene Speicherbatterie als Verbraucher zu berücksichtigen, dessen zusätzliche Aufladung nur innerhalb der genannten erlaubten Betriebsbereiche erfolgen kann, insbesondere wenn kein Wärmespeicher vorhanden sein sollte. Das Höchstmaß der momentanen Stromerzeugung ist durch die abnehmbare Wärmemenge $\dot{Q}_W$ begrenzt (Abb. 7.6).

Je kleiner das augenblicklich zu erfüllende Strom-Wärme-Verhältnis des Haushalts ist, desto mehr Reserve bleibt für die Batterieaufladung.

Arbeitet zum Beispiel die Maschine mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 10%, so ist die verfügbare Reserve im kritischen Monat Oktober minimal und beträgt etwa 34%. Die Reserve ergibt sich bei diesem Wirkungsgrad aus dem Quotienten des momentanen Strom-Wärme-Verhältnisses zu dem Wert 0,11, denn wenn das Strom-Wärme-Verhältnis unter 0,11 fällt, muß der Wärme-Bypass geöffnet werden (siehe Abb. 7.6). In diesem Fall besteht also die Möglichkeit, mehr Strom produzieren als für den Haushalt erforderlich ist, um die Batterien zu versorgen.

Rechnet man sicherheitshalber auch im Oktober mit einem Maximum für den Haushalt von 0,85 kW, so würde eine Reserve von 34% einer Leistung von etwa 1,2 kW entsprechen. Entscheidet man sich für diese Leistung für die Dampfmaschine, so würde sie im Mittel mit 0,52 kW zu etwa 50% ausgelastet sein. Der regelbare Arbeitsbereich ohne Wirkungsgradeinbuße würde also zwischen 0,3 und 1,2 kW liegen. Während der Nachtstunden von 00:00 bis 06:00 Uhr mit einer Anforderung von 0,15 kW beträgt das Strom-Wärme-Verhältnis etwa 0,05, so daß hier ein elektrischer Wirkungsgrad von etwa 4,8% ausreicht.

Aus diesen Betrachtungen heraus folgt für ***allgemeine private Haushalte***:

Richtwert für die elektrische Leistung des Generators des Hybridsystems: $P_{G,elektrisch} = z \cdot 1{,}2 kW$ (8.11)

mit z als Umrechnungsfaktor nach Gleichung (5.13).

Der erforderliche mechanische Wirkungsgrad der Dampfmaschine richtet sich nach der Wirkungsgradkette, die durch die Verknüpfung mit dem Generator, der Batterie und den eingesetzten elektrischen Umrichtern wie Wechselrichter oder Gleichstromsteller. Schätzt man für den Generator dieser Nennleistung einen Wirkungsgrad von etwa 80% und für die elektrische Anbindung in der Summe effektiv mit 90%, würde sich für die mechanische Leistung der folgende Richtwert ergeben:

Richtwert für die mechanische Leistung der Dampfmaschine: $P_{DM,mechanisch} = z \cdot 1{,}7 kW$ (8.12)

Mit der Festlegung der Dampfmaschinenleistung kann mit Rücksicht auf den maximalen Wärmebedarf der Verdampfer sowie die Wärmeversorgung dimensioniert werden.

8.3 Dampferzeuger und Wärmeversorgung

Der Verdampfer muß die Summe der vom Haushalt geforderten Leistungen einschließlich der auftretenden Umwandlungsverluste zur Verfügung stellen. Ausschlaggebend für die erforderliche Nennleistung ist das zu erwartende Maximum während des Winters.

Die maximale elektrische Leistung eines durchschnittlichen Haushalts ist durch die Festlegung der mechanischen Leistung der Dampfmaschine mit 1,7 kW vorgegeben. Bei einem mittleren mechanischen Wirkungsgrad von 0,1 werden in diesem Fall für die Stromerzeugung mindestens 17 kW Dampfleistung benötigt.
Der maximale Wärmebedarf beträgt im Januar etwa 175 kWh/Tag. Betrachtet man den Verlauf der relativen Wärmelast in Abb. 5.5 für einen Wintertag, so findet zeigt sich ein maximaler Anteil von 6,5% um 18:00 Uhr. Daraus ergibt sich eine Wärmelast von etwa 11,4 kW. Zusammen mit der erforderlichen mechanischen Leistung ohne Reserve sind etwa 12,6 kW in Form von Dampf aufzubringen.

Dieser Wert ist mit einer Festlegung der Nennleistung des Dampferzeugers auf mindestens 17 kW erfüllbar. Dieser Wert schließt analog zur elektrischen Leistung einen Sicherheitszuschlag von etwa 34% ein.

Für den ***allgemeinen privaten Haushalt*** ergibt sich:

Richtwert für die Nennleistung des Dampferzeugers: $$P_{Dampferzeuger} = z \cdot 17kW \quad . \tag{8.13}$$

Diese maximal erzeugbare Wärmeleistung muß über die Wärmetauscher im Heizungskreislauf und Warmwasserkreislauf abgegeben werden können. Den Hauptanteil übernimmt dabei im Mittel der Wärmetauscher für den Heizungsbetrieb.

Der Warmwasseranteil ist unabhängig von der Jahreszeit im Mittel als konstant anzunehmen. Der relative Lastgang während eines Tages kann der Abb. 5.5 als Typ 5 entnommen werden und zeigt ein Maximum von nahezu 10% um 18:00 Uhr.

Bei einer Prozeßwärmeleistung von etwa 15,4 kWh/Tag folgt eine maximale Übertragungsleistung für den Wärmetauscher von mindestens 1,6 kW.

Die handelsüblichen Warmwasserspeicher sind jedoch für größere Wärmeleistungen ausgelegt, wie zum Beispiel im Versuchsaufbau mit 22 kW. Damit ist eine wesentlich kürzere Aufladezeit des Speichers möglich. Aus diesem Grund sollte der Wärmetauscher für die Warmwasserversorgung ebenso groß ausgelegt werden wie derjenige für den Heizungskreislauf.

Somit sollten beide Wärmetauscher in der Lage sein, die gesamte vom Dampferzeuger lieferbare Wärmeleistung von 17 kW abzuführen.

Zusammenfassend gilt also für ***allgemeine private Haushalte***:

Richtwert für die jeweilige Wärmeleistung der Wärmetauscher für denWarmwasser- und Heizkreislauf: $P_{Wärmetauscher} = z \cdot 17kW$

. (8.14)

Für die Auslegung des *Speisewasservorwärmers* ist eine Eingangstemperatur von 100°C (1 bar Kondensatordruck) anzunehmen.

Zur Abschätzung der oberen Grenze des Massestroms muß mit einer Dampfenergie von etwa 2674 kJ/kg (1 bar Sattdampf) gerechnet werden. Damit bedingt die Leistung von 17 kW einen Wasserdurchfluß von etwa 23 kg/h.
Soll diese Wassermenge maximal um 80° gekühlt werden, so sollte die Wärmetauscherleistung für einen allgemeinen Haushalt mit $z \cdot 2kW$ bemessen werden.

Richtwert für die Wärmeleistung des Speisewasservorwärmers: $P_{Speisewasservorwärmer} = z \cdot 2kW$

. (8.15)

Diese Wassermenge ist mit der Druckerhöhungspumpe gegen den Kesseldruck zu fördern. Die elektrische Leistung für diese Pumpe ist mit Gleichung 7.37 zu berechnen. Bei einem angenommenen Pumpenwirkungsgrad von 40% (Kreiselpumpe) und einem Kesseldruck von 6 bar benötigt man $z \cdot 9{,}7W$. Dieser Wert zeigt, daß diese aufzubringende Leistung bei der Wirkungsgradberechnung des Dampfkraftprozesses mit Recht vernachlässigbar ist.

Richtwert für die elektrische Leistung der Druckerhöhungspumpe: $P_{Druckerhöhungspumpe,el} \approx z \cdot 10W$

. (8.16)

Wie die hier vorgenommene Auslegung der Komponenten für das Hybridsystem zeigt, stimmen die für den durchschnittlichen Privathaushalt benötigten Leistungsdaten gut mit den Kenndaten des Versuchsaufbaus überein.

8.4 Energiespeicher und elektrische Komponenten

Wie bereits ausgeführt, kann bei der in dieser Arbeit vorgestellten Betriebsführung auf einen Wärmespeicher verzichtet werden, unter der Voraussetzung, daß die Komponenten den obigen Dimensionierungs-Kriterien entsprechen.

Im Gegensatz dazu hat der Batteriespeicher eine entscheidende Bedeutung für das Hybridsystem. Zum einen bilden sie das Schnittstellen-Element zwischen der PV-Anlage und der KWK-Anlage und zum anderen haben die Akkumulatoren eine Puffer-Funktion für die Stromversorgung.

Sowohl kurzfristig auftretende Leistungsspitzen, welche die Nennleistung des Generators überschreiten, als auch zeitliche Verzögerungen aufgrund einer zu trägen Lastanpassung können damit abgefangen werden.

Das erarbeitete Steuerungskonzept benutzt den zu messenden Ladezustand (Ah), um das Hybridsystem in den jeweils erforderlichen Betriebszustand zu versetzen.

Für die Abschätzung der erforderlichen Speicherkapazität ist der Sommerbetrieb ausschlaggebend, da der Generator im Winter, wie gezeigt, in der Lage ist, die geforderte Leistung zu bringen (Abb. 8.3). Von Mitte April bis fast Ende August besteht die Möglichkeit, die Stromversorgung über die PV-Anlage zu erreichen.
Für einen durchschnittlichen privaten Haushalt stehen dem täglichen Stromverbrauch einer typischen Sommerwoche von 7,439 kWh im Mittel 9,206 kWh (Mai) gegenüber, so daß bei einem tatsächlichen repräsentativen Tag ein Überschuß von mindestens 1,8 kWh besteht, der einem Akkumulator zugeführt werden könnte. Dieser statistische Überschuß steigt im Juni maximal auf etwa 3 kWh. Innerhalb einer Woche, als periodische Zeiteinheit, würden sich so etwa 12,6 bis 21 kWh speichern lassen. Dies entspricht in diesem Fall dem Energiebedarf für 1,8 bis 2,8 Tagen.

Für den Speicherinhalt eines Wochen-Energiebedarfs im Sommer benötigt man etwa 52 kWh. Dieser Speicherkapazität entsprechen zum Beispiel 36 Stück 12-Volt-Batterien mit je 120Ah.

Geht man also sicherheitshalber von dem Wochen-Energiebedarf aus, so ergibt sich für den ***allgemeinen privaten Haushalt***:

Richtwert für die Akkumulator-Kapazität
des Hybridsystems: $C_{Batterie} = z \cdot 52 kWh$. (8.17)

Die Nennleistung des *Bidirektionalen-Wechselrichters* ist gleich der maximalen elektrischen Leistung des Generators nach (8.11) zu wählen.

Die Dimensionierung des Wechselrichters zur Versorgung der Wechselstrom-verbraucher hingegen muß sich nach der maximal möglichen Verbraucheranforderung richten. Hier sind bei Haushalten mit kurzfristigen Spitzenanforderungen um ca. 10 kW und mehr zu rechnen.

Eine Ausrichtung des Wechselrichters nach diesen Werten hätte allerdings einen permanent stark ausgeprägten Teillastbetrieb mit einem entsprechend schlechten Wirkungsgrad zur Folge.

Es empfiehlt sich daher, in einem autark versorgten Haushalt die maximal möglichen Spitzenanforderungen der Wechselstromverbraucher zu minimieren, entweder durch eine entsprechende Geräteauswahl und/oder durch ein Lastmanagement [8.3].

Die im Haushalt vorhandenen Geräte sollten nach Möglichkeit weitestgehend in einer Gleichstromversion ausgeführt werden, so daß der Wechselrichter mit gutem Wirkungsgrad nur noch einige leistungsstärkere Wechselstromverbraucher versorgen muß. Dadurch lassen sich die mit der Stromwandlung verknüpften Verluste minimieren. Für einen verbreiteteren Einsatz wäre eine Normung der Gleichstromschiene erforderlich, der eine Anpassung des Marktes auf diese Bedürfnisse folgen müßte.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Auslegung der Stromschienen ist bei autarker Betriebsweise der Eigenverbrauch des Hybridsystems, der einen Betrieb ja erst ermöglicht.

Dies bedeutet zunächst, daß die Batterien beim Start der Anlage über einen ausreichenden Ladezustand verfügen müssen. Deshalb sollte immer mit einer gewissen Restreserve für die Batterieladung gerechnet werden.

Bei der Auswahl der Komponenten für die Meß- und Regeltechnik und der Steuerung ist auf einen sparsamen Eigenverbrauch zu achten. Diese Komponenten sollten ausschließlich mit Gleichstrom betrieben werden. Dies gilt auch für die Druckerhöhungspumpe sowie die eventuell vorhandene Kondensatrücklaufpumpe.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit zeigt, daß es möglich ist, private Haushalte bei den hiesigen oder vergleichbaren klimatischen Verhältnissen mit Hilfe eines Hybridsystems, bestehend aus PV-Anlage und Dampfmaschine mit Kraft-Wärme-Kopplung, ganzjährig autark mit Energie zu versorgen.

Da das Arbeitsmittel 'Dampf' dabei mit Hilfe einer externen Verbrennung erzeugt wird, besteht eine größtmögliche individuelle Freiheit bezüglich der Wahl des Brennstoffes.

Somit kann durch den Einsatz von Biomasse, vornehmlich in fester Form, eine *vollständig regenerative Energieversorgung* ermöglicht werden.

Im Rahmen der durchgeführten systemtechnischen Untersuchung wurde das Energieverbrauchsverhalten eines durchschnittlichen privaten Haushalts in Deutschland aufgezeigt und mit dem Strahlungsangebot der Sonne korreliert.

Die Lastganglinien privater Haushalte, sowohl für Strom als auch für Wärme, sowie die zeitlichen Änderungen der Sonneneinstrahlung, wurden analysiert und einer mathematischen Darstellung zugänglich gemacht.

Daraus ergibt sich ein berechenbares Anforderungsprofil für die Energieerzeugung mit Hilfe einer Dampfmaschine mit Kraft-Wärme-Kopplung.

Ausgehend von einem maximalen elektrischen Wirkungsgrad von etwa 10% für die Kraft-Wärme-Kopplung wurde das Gesamtsystem für private Haushalte dimensioniert.

Ein experimenteller Versuchsaufbau mit einer 'historischen' Dampfmaschine ergänzt durch ein erstelltes Simulations-Computerprogramm, sowie durch eine eingehende physikalische Analyse der technischen Zusammenhänge, liefern wertvolle Erkenntnisse für weitergehende Entwicklungen bis zum tatsächlichen praktischen Einsatz eines solchen Hybridsystems.

Mit Hilfe der Systemanalyse konnten die Bedingungen für einen energetisch ausgeglichenen Betrieb der Kraft-Wärme-Kopplung hergeleitet werden. Dieser sich daraus ergebende 'erlaubte' Arbeitsbereich läßt sich in einem Diagramm zusammenfassend darstellen.

Auf der Grundlage der experimentellen Erfahrungen mit einem Versuchsaufbau und der physikalischen Analyse wurden die erforderlichen Komponenten für das Hybridsystem zusammengestellt und ein Verfahrensschema erstellt.

Für den praktischen Betrieb eines solchen Hybridsystems wurde aufbauend auf die gesammelten Erfahrungen mit dem Versuchsaufbau und der Simulation, ein Regelungs- und Steuerungskonzept entwickelt.

Nachteilig für die Untersuchen war der Umstand, daß derzeit auf dem Markt keine 'moderne' Dampfmaschine der in Frage kommenden Leistungsklasse verfügbar ist. Deshalb mußte auf ein 'historisches' Modell zurückgegriffen werden.

Die eingesetzte 'alte' Maschine ist von der Zeit gezeichnet und konnte daher vorerst im wesentlichen nur qualitativen, prinzipiellen Versuchen dienen.

Diese Tatsache beeinträchtigte aber die gesteckte Zielsetzung nicht, denn die grundlegenden Eigenschaften von Dampfmaschinen sind hinlänglich bekannt.

Aus diesem Grund stützt sich das Konzept für die Betriebsweise eines solchen Hybridsystems wesentlich auf die Simulation mit dem Rechner und der damit verbundenen physikalischen Beschreibung.

Somit versteht sich diese Arbeit im wesentlichen als grundlegende systemtechnische Untersuchung im Sinne einer 'Machbarkeitsanalyse', die als aufbaufähige Basis für weitergehende Entwicklungsarbeiten dienen kann.

Auf der Basis von Erfahrungswerten eines durchschnittlichen privaten Haushalts für den Wärme- und Stromverbrauch, konnten die dafür erforderlichen Komponenten für das Hybridsystem dimensioniert werden.

Bis zu einem tatsächlichen realen Einsatz eines derartigen Hybridsystems in privaten Haushalten sind noch etliche Entwicklungsarbeiten erforderlich.

Primär ist die Konstruktion einer 'modernen' Dampfmaschine (Dampfkolbenmotor) für eine Leistung bis 5 kW zu nennen. Hierbei müssen die Fähigkeiten und Erkenntnisse des heutigen Maschinenbaus genutzt werden, um eine Maschine zu erhalten, die im Vergleich zur 'historischen' Maschine klein und kompakt ist.

Damit zusammenhängend bildet die Entwicklung eines mit vornehmlich mit 'fester' Biomasse betriebenen Dampferzeugers, der über eine für das Hybridsystem ausreichende Teillastfähigkeit verfügt, eine weitere zu lösende Aufgabe.

Für die Erreichung dieser Zielsetzungen kann auf bereits vorhandene Erfahrungen mit *größeren* Dampfmotoren zurückgegriffen werden, denn derzeit werden in Bayern immerhin 40% aller Kraft-Wärme-Kopplungen für Holzbrennstoffe mit Dampfkolbenmotoren betrieben. Dabei werden elektrische Gesamtwirkungsgrade von 16% erreicht [9.1].

Dies zeigt auch, daß die Überlegung, das Hybridsystem auf die Verfeuerung von fester Biomasse abzustimmen, sich auf bereits eingeschlagene Wege stützt.

Auch aus diesem Grunde ist die Möglichkeit des Einsatzes eines derartigen photovoltaischen Hybridsystems in Zukunft durchaus aussichtsreich.

Anhang

A Liste der Veröffentlichungen zu dieser Arbeit:

1. "PV-Generator linked to a Piston-Type Steam Engine with Combined Heat and Power as a Hybridsystem for a completely self-sufficient Energy-Supply"
   K. Brinkmann & D. Hackstein
   2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna Austria, 6-10 July 1998

2. "Physical Analysis of a Hybridsystem consisting of a PV-Generator linked to a Piston-Type Steam Engine with Combined Heat and Power for a completely self-sufficient Energy-Supply"
   K. Brinkmann & D. Hackstein
   11. Internationales Sonnenforum 1998 , 26.-30. Juli' 98 Köln

3. "Kombinierte Nutzung von Biomasse und Sonnenenergie zum Betrieb eines Hybridsystems bestehend aus Kraftwärmekopplung mit Dampfmaschine und Photovoltaikanlage"
   K. Brinkmann & D. Hackstein
   Siebtes Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik 11. und 12. 11. 98 Deggendorf

4. "Simulation eines Hybridsystems bestehend aus Kraftwärmekopplung mit Dampfmaschine und Photovoltaikanlage "
   K. Brinkmann, R. Taubner & D. Hackstein
   14. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 10.-12.03.99 Staffelstein

B Bildzeichen und Kennbuchstaben für Messen ,Steuern, Regeln in der Verfahrenstechnik DIN 19227

PI	Druckmessung, Anzeige örtlich
LI	Füllstandsmessung, Anzeige örtlich
TI	Temperaturmessung, Anzeige örtlich
FI	Durchflußmessung, Anzeige örtlich
PIS	Druckmessung, Anzeige örtlich mit Überwachung
TIC	Temperaturregelung, Anzeige der Regel- und Führungsgröße
PIC	Druckregelung, Anzeige der Regel- und Führungsgröße
TICS	Temperaturregelung, Anzeige der Regel- und Führungsgröße mit Überwachung
SICSA$^{\pm}$	Drehzahlregelung, Anzeige der Regel- und Führungsgröße mit Überwachung und Alarm bei Erreichen des oberen bzw. unteren Grenzwertes

Auszug aus Sinnbilder nach DIN 2481 [240]

1. Stoffe und Leitungen

Dampfleitung

Kreislaufwasser bzw. Kondensat

Steuerleitung , Signalleitung

Kreuzungen ohne Verbindungsstelle

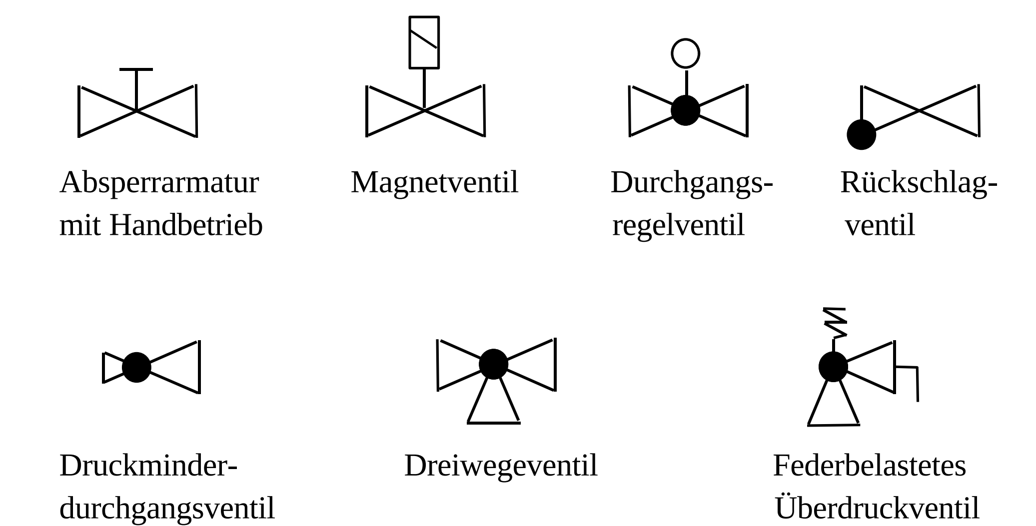
Abzweigstelle

2. Wärmeübertrager

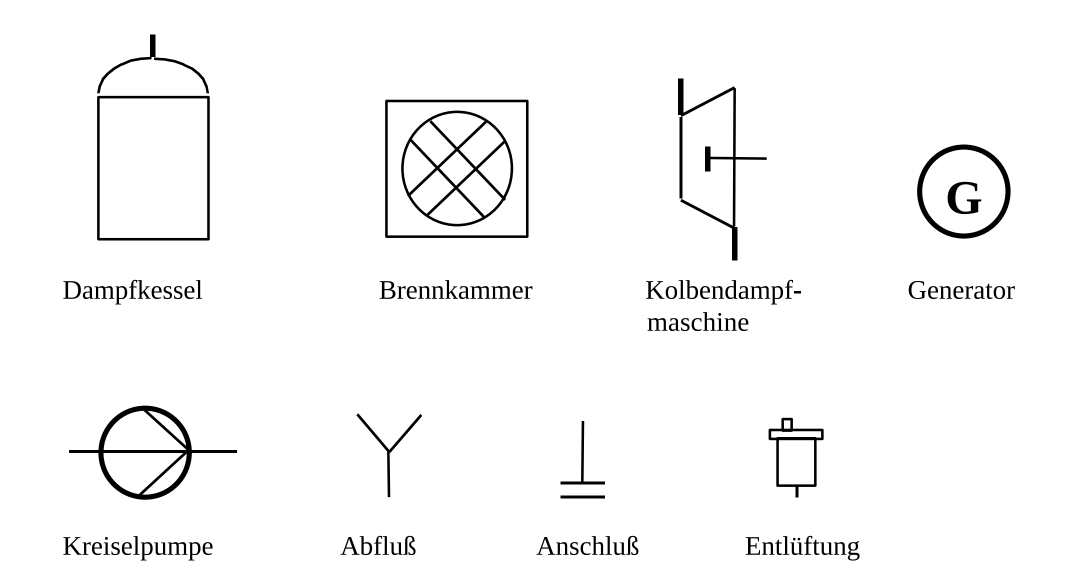
Wärmetauscher

Kühlturm

3. Armaturen

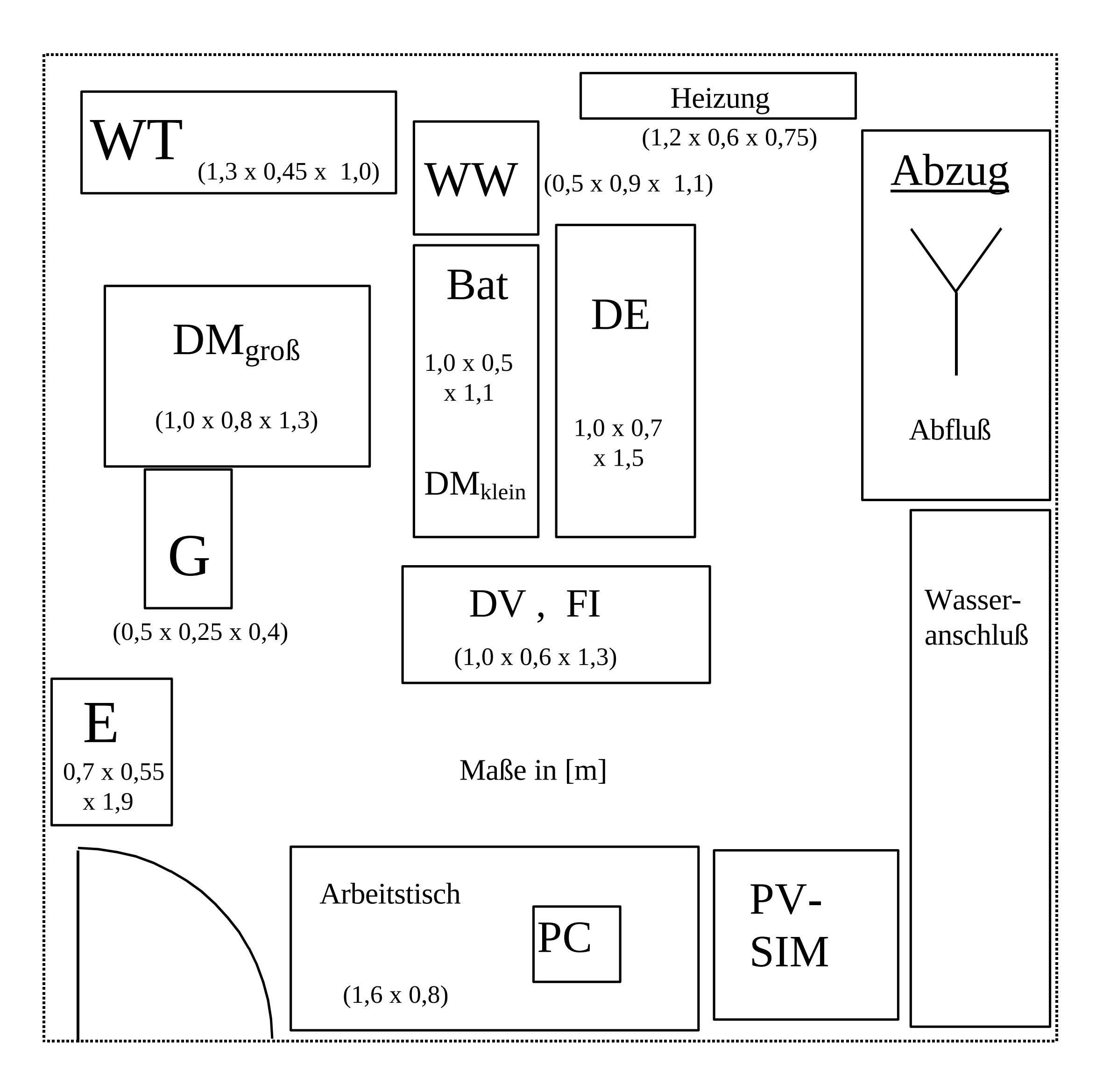


4. Sonstige



C Versuchsaufbau - Aufstellungsplan

(nicht maßstabsgetreu)

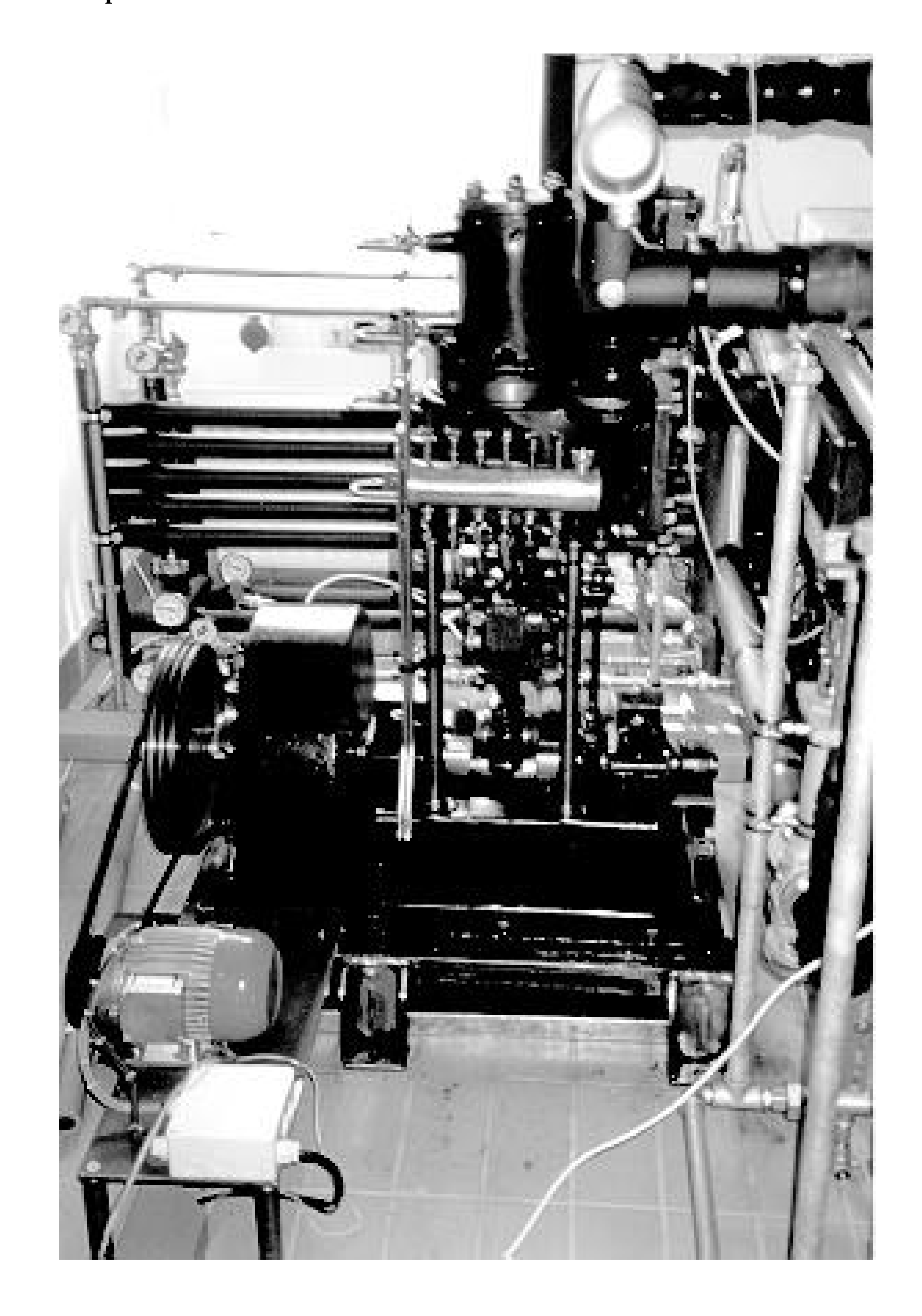


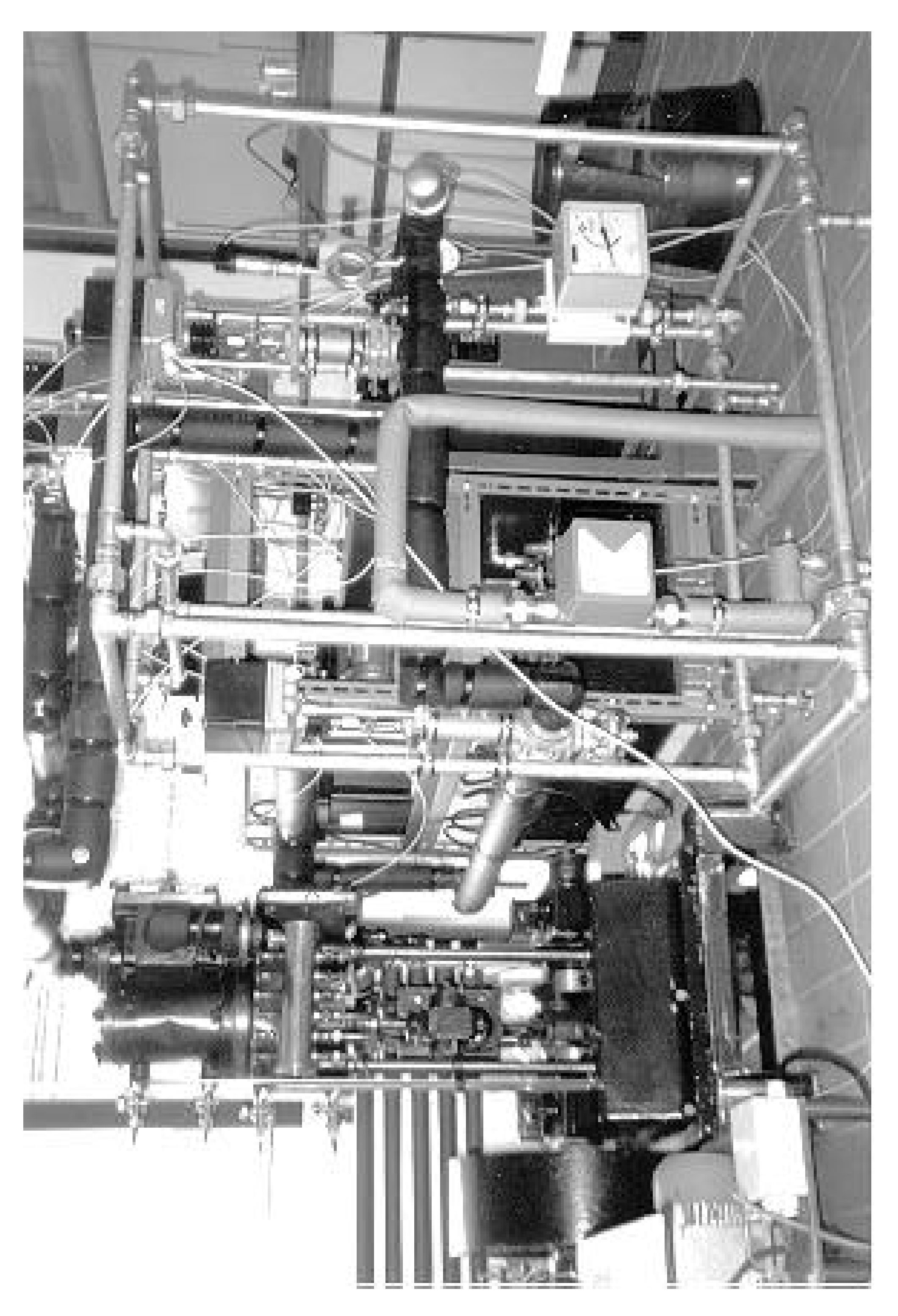
Erläuterungen:

WT	≡	Wärmetauscher
WW	≡	Warmwasser-Speicher
DM	≡	Dampfmaschine
DE	≡	Dampferzeuger
DV	≡	Dampfventile
FI	≡	Durchflußmessungen
Bat	≡	Speicherbatterien
G	≡	Generator
E	≡	Elektronik / Steuerung
PV-SIM	≡	PV-Generator-Simulator
PC	≡	Computer

D Experimenteller Aufbau

1. Dampfmaschine





2. Frontansicht

Literaturverzeichnis

Literatur zu Kapitel 1: Einleitung und Zielsetzung

[1.1] D. Nelles / Ch. Tuttas
Elektrische Energietechnik, B.G. Teubner Stuttgart 1998

[1.2] Volker Quaschning
Regenerative Energiesysteme, Carl Hanser München Wien 1998

[1.3] Vorlesungsblätter Landtechnik Weihenstephan 1997/98
Nachwachsende Rohstoffe und erneuerbare Energieformen
Zusammenstellung B. Widmann

[1.4] Bild der Wissenschaft August 1998
Konfusion um Kernfusion

[1.5] VDEW
Energieträger bei der Stromerzeugung 1997 - Stromquellen
Internetadresse: http://www.vdew.de/zf_sz211.htm 1998

[1.6] Leonhard Müller
Handbuch der Elektrizitätswirtschaft
Technische, wirtschaftliche und rechtliche Grundlagen
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1998

[1.7] Agenda 21
Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen (UNCED)
Juni 1992
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

[1.8] Martin Kaltschmitt / Andreas Wiese
Erneuerbare Energien
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1997, 2. Auflage

[1.9] Prof. Dr.-Ing. D. Hackstein
Skriptum zur Experimentalvorlesung Photovoltaik II,
Kurs 2158 FernUniversität Hagen

[1.10] Prof. Dr. Peter Hennicke
Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie
Erneuerbare Energien 6/1998

[1.11] K. Brinkmann & D. Hackstein
"Kombinierte Nutzung von Biomasse und Sonnenenergie zum Betrieb eines Hybridsystems bestehend aus Kraftwärmekopplung mit Dampfmaschine und Photovoltaikanlage"
Siebtes Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik 11. und 12. 11. 98 Deggendorf

Literatur zu Kapitel 2: Photovoltaik

[2.1] Gerthsen / Kneser / Vogel
Physik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1986, 15. Auflage

[2.2] H. K. Köthe
Stromversorgung mit Solarzellen, Franzis-Verlag München 1988

[2.3] N. Pucker
Physikalische Grundlagen der Energietechnik
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1986

[2.4] DIN 5034 Teil 2, Tageslicht in Innenräumen, Grundlagen
Beuth-Verlag Berlin 1985

[2.5] DIN 4710, Meteorologische Daten, Beuth-Verlag Berlin 1982

[2.6] W. Palz / J. Greif
European Solar Radiation Atlas,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1996

[2.7] E. F. Schmidt
Unkonventionelle Energiewandler, Elitera-Verlag Berlin 1975

[2.8] W. R. Fahrner / D. Hackstein / R. Schindler
Photovoltaik I, Kurs 2157 FernUniversität Hagen 1992

[2.9] A. Goetzenberger / B. Voß / J. Knobloch
Sonnenenergie: Photovoltaik, Teubner Stuttgart 1994

[2.10] Prof. Dr.-Ing. D. Hackstein
Skriptum zur Experimentalvorlesung Photovoltaik II,
Kurs 2158 FernUniversität Hagen

[2.11] Volker Quaschning
Regenerative Energiesysteme, Carl Hanser München Wien 1998

[2.12] H. Häberlin
Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz
AT Verlag Aarau/Schweiz 1991

[2.13] Prof. Dr. J. Luther
Photovoltaische Energieversorgung für Inselnetze und industrielle Produkte
VDI Berichte Nr. 1236, VDI Verlag Düsseldorf 1996

[2.14] A. Lindemann,
Konzeption und Realisierung eines Stromrichters mit IGBTs für Photovoltaikanlagen im Inselbetrieb
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 21: Elektrotechnik Nr. 145
VDI Verlag Düsseldorf 1993

[2.15] M. Jantsch
Systemtechnische Untersuchung des Nutzungsgrades photovoltaischer Anlagen
Analyse und Optimierung von Strukturen und Wirkungszusammenhängen
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6: Energietechnik Nr. 336
VDI Verlag Düsseldorf 1996

[2.16] V. Quaschning
Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen Systemen
Dr. Köster Verlag Berlin 1996

[2.17] H.-J. Lewerenz / H. Jungblut
Photovoltaik , Grundlagen und Anwendungen
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1995

[2.18] W. Palz / J. Greif
European Solar Radiation Atlas
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1996

Literatur zu Kapitel 3: Kraft-Wärme-Kopplung

[3.1] Liviu Constantinescu-Simon (Hrsg.)
Handbuch Elektrische Energietechnik, Grundlagen Anwendungen
Vieweg-Verlag Braunschweig Wiesbaden 1996

[3.2] D. Nelles / Ch. Tuttas
Elektrische Energietechnik, B.G. Teubner Stuttgart 1998

[3.3] P. Heymann / H. Sauerwein (Hrsg.)
Elektrotechnik, Ernst Klett Verlag Stuttgart Dresden 1993

[3.4] IDEE Informationsdienst Erneuerbare Energien
Nr. 17 14. Sept. 1998 H 45851
Verlag SunMedia Hannover

[3.5] K. W. Schmitz / G. Koch
Kraft-Wärme-Kopplung
Anlagenauswahl - Dimensionierung , Wirtschaftlichkeit - Emissionsbilanz
2., überarbeitete Auflage, VDI Verlag Düsseldorf 1996

[3.6] W. Krause
Blockheizkraftwerke in der Region
Technik, Finanzierung, Hemmnisse
Wege in die Solargesellschaft V
Projektgruppe Solarenergie FH Darmstadt 1993

[3.7] VDEW, Strom-Zahlen / Kraft-Wärme-Kopplung
Internetadresse: http://www.vdew.de/zf_sz_52.htm 1998

[3.8] R. Gottschalk
Kompakte Heiz-Kraft-Anlagen
Physik in unserer Zeit / 23. Jahrg. 1992 / Nr. 2
VCH Verlagsgesellschaft Weinheim

[3.9] VDI nachrischten
Kraft-Wärme-Kopplung im Heizungskeller
31. Oktober 1997 Nr. 44

[3.10] VDI 3985
Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von
Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungsmaschinen
Beuth-Verlag Berlin 1997

[3.11] H. Wendt, Wasserstoffverstromung in Brennstoffzellen
Ringvorlesung "Regenerative Energien"
TH Darmstadt, VDE Darmstadt, HEAG 1994

[3.12] K. Heinloth, Energie
Physikalische Grundlagen ihrer Gewinnung, Umwandlung und Nutzung
Teubner Stuttgart 1983

[3.13] Martin Werdich, Stirling-Maschinen
Grundlagen Technik Anwendungen
Ökobuch Verlag Staufen bei Freiburg 1991

[3.14] H. D. Sauer, Heizkraftwerk mit Stirlingmotor, Stromthemen 7/98
IZE Frankfurt

[3.15] R. Buck / D. Laing / W. Schiel
Solarthermie für Dezentrale Stromerzeugung
Forschungsverbund Sonnenenergie Themen 96/97, DLR Köln 1997

Literatur zu Kapitel 4: Photovoltaische Hybridsysteme

[4.1] A. Zahedi
Solar Photovoltaik Energy Systems: Design and Use
The New World Publishing, Melbourne, Australia 1998

[4.2] Prof. Dr.-Ing. D. Hackstein
Skriptum zur Experimentalvorlesung Photovoltaik II,
Kurs 2158 FernUniversität Hagen

[4.3] Prof. Dr. J. Luther
Photovoltaische Energieversorgung für Inselnetze und industrielle Produkte
VDI Berichte Nr. 1236, VDI Verlag Düsseldorf 1996

[4.4] A. Marko
Integrierte Konzepte zum Einsatz der Solarenergie in der Kraftwerkstechnik
Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6: Energietechnik Nr. 318
VDI Verlag Düsseldorf 1995

[4.5] Dr. Peter Lamp
"Neuere Konzepte zur Kraft-Wärme-Kopplung mit Biomasse"
Siebtes Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik
11. und 12. 11. 98 Deggendorf

[4.6] P. Göricke
"Nutzung von Umweltwärme mit Elektrowärmepumpen"
VDI Berichte 1019 , Blockheizkraftwerke und Wärmepumpen
VDI Verlag Düsseldorf 1993

[4.7] H. Darrelmann
"Alternative Speichermedien"
VDI GET Jahrbuch 97, VDI Verlag Düsseldorf 1997

[4.8] H. Häberlin
Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz
AT Verlag Aarau/Schweiz 1991

[4.9] H. K. Köthe
Stromversorgung mit Solarzellen, Franzis-Verlag München 1988

[4.10] W. Kleinkauf / F. Raptis
"Elektrifizierung mit erneuerbaren Energien - Hybridanlagentechnik zur dezentralen, netzkompatiblen Stromversorgung"
Forschungsverbund Sonnenenergie Themen 96/97 , DLR Köln

[4.11] R. Buck / D. Laing / W. Schiel
"Solarthermie für Dezentrale Stromerzeugung"
Forschungsverbund Sonnenenergie Themen 96/97 , DLR Köln

[4.12] Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmid
Rationelle Energiewandlung project: AREP
Internetadresse: http://www.re.e-technik.uni-kassel.de/re/projekte/AREP.htm
Stand 1998

[4.13] Dr. Hans Hartmann
Energie aus Biomasse Landtechnik-Bericht Heft 18
Landtechnik Weihenstephan TU München 1996

Literatur zu Kapitel 5: Energieverbrauch eines Privathaushalts

[5.1] B. Geiger / H. Heß
Energiewirtschaftliche Daten
Energieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland
VDI GET Jahrbuch 97, VDI Verlag Düsseldorf 1997

[5.2] VDEW Kurzfassung
Ermittlung der Lastganglinien bei der Benutzung elektrischer Energie
durch die bundesdeutschen Haushalte während eines Jahres
VWEW Frankfurt 1985

[5.3] Impuls-Programm Hessen
Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit
Institut Wohnen und Umwelt (IWU) Darmstadt
Internet-Seiten: IMPULS-Programm Energiefragen.Stromvrbrauch
Internetadresse: http://www.impulsprogramm.de/html/Strom/e_strom1.hlml

[5.4] P. Heymann / H. Sauerwein (Hrsg.)
Elektrotechnik, Ernst Klett Verlag Stuttgart Dresden 1993

[5.5] Volker Quaschning
Regenerative Energiesysteme, Carl Hanser München Wien 1998

[5.6] Prof. Dr.-Ing. Erich Hahne
"Heizen mit Sonnenwärme - wird das wirtschaftlich ?"
Ringvorlesung "Regenerative Energien"
TH Darmstadt, VDE Darmstadt, HEAG 1994

[5.7] F. Hell
Rationelle Heiztechnik
VDI Verlag Düsseldorf 1989

[5.8] Prof. Dr.-Ing. G. Kraft
Heizungstechnik
Verlag Technik Berlin 1991

[5.9] F. Steinborn
BHKW-Plan Benutzerhandbuch
Wirtschaftliche Auslegung und Planung von Blockheizkraftwerken
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) 1998

[5.10] H. Vogelsang
Energie-Management-System zur optimalen Auslegung von Heizkraftwerken
Fortschrittberichte VDI Reihe 6 : Energietechnik Nr.371
VDI Verlag Düsseldorf 1997

Literatur zu Kapitel 6: Kraft-Wärme-Kopplung mit Dampfmaschine

[6.1] F. Herrmann
Physik III Thermodynamik
Skripten zur Experimentalphysik
Abteilung für Didaktik der Physik Universität Karlsruhe 1997

[6.2] W. Greiner / L. Neise / H. Stöcker
Theoretische Physik Band 9
Thermodynamik und Statistische Mechanik
Verlag Harri Deutsch Thun und Frankfurt am Main 1993

[6.3] Dittmann / Fischer / Huhn / Klinger
Repetitorium der Technischen Thermodynamik
B. G. Teubner Stuttgard 1995

[6.4] K. Lucas
Thermodynamik Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen
Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1995

[6.5] W. Berties
Übungsbeispiele aus der Wärmelehre
Verlag Vieweg & Sohn Braunschweig Wiesbaden
16., verbesserte Auflage 1988

[6.6] F. Dietzel
Technische Wärmelehre
Vogel Buchverlag Würzburg 6. Auflage 1992

[6.7] VDI Wärmeatlas , 7. Auflage
VDI Verlag Düsseldorf 1995

[6.8] Prof. Dr. Rudolf Thiele
"Energieerzeugung ohne Umweltbelastung?
Fallbeispiele aus der Praxis"
Ringvorlesung "Regenerative Energien"
TH Darmstadt, VDE Darmstadt, HEAG 1994

[6.9] Dr. Peter Lamp
"Neuere Konzepte zur Kraft-Wärme-Kopplung mit Biomasse"
Siebtes Symposium Biobrennstoffe und umweltfreundliche Energietechnik
11. und 12. 11. 98 Deggendorf

[6.10] Herm. Haeder
Die Dampfmaschinen, Schwann 1898 Düsseldorf, 5. Auflage

[6.11] M. F. Gutermuth
Die Dampfmaschine Bd. I-III, Springer Berlin 1928

[6.12] K. W. Schmitz / G. Koch
Kraft-Wärme-Kopplung
Anlagenauswahl - Dimensionierung , Wirtschaftlichkeit - Emissionsbilanz
2., überarbeitete Auflage, VDI Verlag Düsseldorf 1996

[6.13] Technische Beschreibung Spilling-Dampfmotor
Firmenschrift 1996
Spillingwerk GmbH Hamburg

[6.14] E. Schmidt
Thermodynamik 9., verbesserte Auflage
Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg 1962

[6.15] Energietechnische Arbeitsmappe 14. Auflage VDI Verlag 1995

[6.16] W. Kalide
Energieumwandlungen in Kraft- und Arbeitsmaschinen
Carl Hanser Verlag München Wien 7. Auflage 1989

Literatur zu Kapitel 7: Hybridsystem PV + Dampfmaschine mit KWK

[7.1] Dr. Hans Hartmann
Energie aus Biomasse Landtechnik-Bericht Heft 18
Landtechnik Weihenstephan TU München 1996

[7.2] J. Mutschmann / F. Stimmelmayr
Taschenbuch der Wasserversorgung, 7. Auflage
Franckh'sche Verlagshandlung Stuttgart 1975

[7.3] F. Hell
Rationelle Heiztechnik
VDI Verlag Düsseldorf 1989

[7.4] Energietechnische Arbeitsmappe 14. Auflage VDI Verlag 1995

[7.5] Sun Power Solartechnik GmbH
Manual Solargenerator Simulator , undatiert
Sun Power Frankfurt

[7.6] DINO - Anlage- und Maschinenbau GmbH
Elektro-Dampferzeuger CD9 bis 63
DINO Bremen 1996

[7.7] Stuart Models 1995/96
Braye Road Industrial Estate, Vale, Guernsey C.I.
British Isles GY3 5XA

[7.8] Hubantriebe M80, M80Y, M83, M83Y
HORA GmbH , Schloß Holte-Stukenbrock 1997

[7.9] SAMSON APPARATE BAU AG, undatiert
Regelungstechnische Information, „ Strömung und Ventilkennlinien"

[7.10] BRUSA Elektronik
Drehstrom-Antrieb, Firmenschrift, undatiert
Brusa Elektronik Gams / Schweiz

[7.11] O. Föllinger
Regelungstechnik 6. Auflage
Einführung in die Methoden und ihre Anwendungen
Hüthig Buch Verlag Heidelberg 1990

[7.12] D. Weber / M. Nau
Elektrische Temperaturmessung
Mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern
Firmenschrift JUMO Fulda 2. Auflage 1991

[7.13] H. Häberlin
Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz
AT Verlag Aarau/Schweiz 1991

[7.14] K. W. Schmitz / G. Koch
Kraft-Wärme-Kopplung
Anlagenauswahl - Dimensionierung , Wirtschaftlichkeit - Emissionsbilanz
2., überarbeitete Auflage, VDI Verlag Düsseldorf 1996

[7.15] A. Zahedi
Solar Photovoltaik Energy Systems: Design and Use
The New World Publishing, Melbourne, Australia 1998

[7.16] G. Engeln-Mülleges / F. Reutter
Numerische Mathematik für Ingenieure
BI Mannheim Wien Zürich 1987

[7.17] F. Dietzel
Technische Wärmelehre
Vogel Buchverlag Würzburg 6. Auflage 1992

[7.18] W. Hemming
Verfahrenstechnik
Vogel Buchverlag Würzburg 5. Auflage 1989

Literatur zu Kapitel 8: Dimensionierung für einen Privathaushalt

[8.1] DIN 4710, Meteorologische Daten, Beuth-Verlag Berlin 1982

[8.2] K. W. Schmitz / G. Koch
Kraft-Wärme-Kopplung
Anlagenauswahl - Dimensionierung , Wirtschaftlichkeit - Emissionsbilanz
2., überarbeitete Auflage, VDI Verlag Düsseldorf 1996

[8.3] H. Häberlin
Photovoltaik, Strom aus Sonnenlicht für Inselanlagen und Verbundnetz
AT Verlag Aarau/Schweiz 1991

Literatur zu Kapitel 9: Zusammenfassung und Ausblick

[9.1] Dr. Hans Hartmann
Energie aus Biomasse Landtechnik-Bericht Heft 18
Landtechnik Weihenstephan TU München 1996

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	:	Klaus Brinkmann
Geburtsdatum	:	16. Dezember 1957
Geburtsort	:	Rheinkamp / Moers
Familienstand	:	verheiratet, vier Kinder

Ausbildungsdaten

1964 - 1969	Grundschule in Homberg/Duisburg
1969 - 1975	Geschwister-Scholl-Realschule in Moers
1975 - 1978	Käthe-Kollwitz-Gymnasium in Ruhrort/Duisburg
Oktober 1979 - September 1987	Universität Düsseldorf Studienfächer Physik und Chemie
April 1982	Diplom-Vorprüfung Chemie
Oktober 1984	Diplom-Vorprüfung Physik
September 1987	Diplomprüfung Physik

Berufliche Tätigkeit

Juli 1978 - September 1979	Grundwehrdienst bei der Marine
April 1984 - September 1987	studentische Hilfskraft Physik
Dezember 1987 - Juni 1988	Gewerbereferendar in Düsseldorf
Juli 1988 - Juni 1996	Entwicklungsingenieur und Projektleiter bei Unternehmen der Klöckner-Werke AG
seit Juli 1996	wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehrgebiet Elektrische Energietechnik an der FernUniversität Hagen